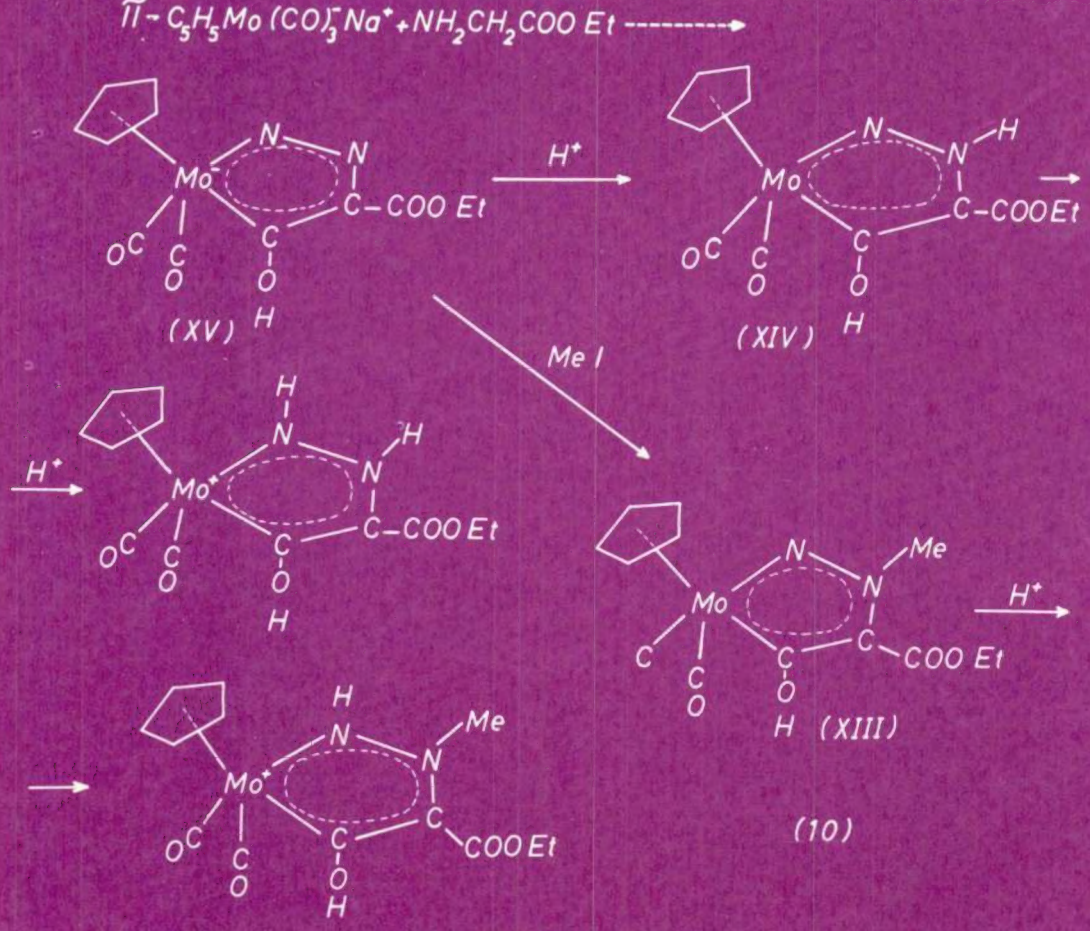
técnica



411 associação dos estudantes do instituto superior técnico
outubro 1971 revista de engenharia

VARÕES DE AÇO DE ALTA RESISTÊNCIA PARA BETÃO ARMADO TIPO A. 40
(«Heliaço» e «SNT 40»)

TENSÕES DE SEGURANÇA
Ra = 2400 kg/cm²
e
Ra = 4000 kg/cm² (SISMOS)

Literatura e Tabelas de Cálculo fornecidas gratuitamente

HELIAÇO, LDA.

R. DE S. JULIÃO, 41, 4.º D. — LISBOA

Tel.: 36 78 17 - 32 37 06 - 36 94 77

MEXIA HEITOR E BRASÃO FARINHA

TABELAS PARA O CÁLCULO DO BETÃO ARMADO

TECNICA
revista da associação dos estudantes do Instituto Superior Técnico
LISBOA

10.000 obras realizadas

- coberturas
- perfis especiais
- vigas pré-esforçadas
- pavimento trief
- protecção de segurança
- mosaicos
- tubos

materiais novobra

PAVIMENTOS
EM BETÃO PRÉ-ESFORÇADOS (HOMOLOGADOS PELO LAB. NAC. DE ENGENHARIA CIVIL)

LEIRIA PONTE DAS MESTRAS TEL. 2 37 68
LISBOA AV. EST. UNIDOS DA AMERICA, 100, 5.º, Dto. TEL. 77 18 02 - 77 48 20
LAGOA ESTRADA DO CARMO TEL. 94

CIMENTO SECIL

Fábrica:
Outão — Setúbal
Telef. 228824/5

Escritório:
R. do Comércio, 56-3.º
LISBOA 2
Telef. 328201/2/3

técnica

NÚMERO 411 OUTUBRO DE 1971 ANO XLVI VOLUME XXXIV PUBLICAÇÃO MENSAL

DIRECTOR
Guilherme Silva Arroz

ADMINISTRADOR
José Toscano

CHEFE DE REDACÇÃO
Francisco Pedroso

SECRETÁRIO
José Sá da Costa

REDACTORES
António Mouraz Miranda, José de Oliveira Paulo, José Xambre Bento, Maria Teresa Lemos, Rogério Pinto

CONSELHO REDACTORIAL
A. Ferreira dos Santos, A. Romão Dias, Aquiles Gomes, Carlos Rosmaninho, Domingos Moura, F. Sousa Marques, H. Nunes Garcia, J. Borges da Silva, J. P. Figanier, L. Borges Teixeira

DIRECÇÃO, REDACÇÃO E ADMINISTRAÇÃO
Av. Rovisco Pais, I. S. T. — Lisboa
Telefone 73 15 49

PROPRIETÁRIO E EDITOR
— A. E. I. S. T.

★

ASSINATURAS:	5 n.os	10 n.os
Continente e Ilhas	95$00	180$.
Ultramar, Brasil Espanha	100$00	190$.
Estrangeiro	—	200$.
Número avulso ...	—	25$.

Não se publica em Agosto e Setembro

Os artigos assinados são da exclusiva responsabilidade dos autores.

★

Composição e Impressão:
Movigráfica — Rua do Espírito Santo, 19 - A — Odivelas

SUMÁRIO

1 — EDITORIAL

3 — MANUEL ROCHA e A. SILVEIRA — *Determinação de tensões térmicas em barragens de betão por meio de ensaio em modelo.*
Determination of thermical stressses in concrete dams by model tests.

15 — ROCHA TRINDADE — *Aplicações dos arcos de cátodo ôco.*
Applications of hollow cathode arcs.

29 — GUEDES DE MELO — *Efeito do tempo nas características metálicas dos solos.*
Time effect on mechanical characteristics of a soil.

45 — GIRÃO PINA — *Análise elástica de uma placa circular com furo central submetida a um momento radial uniforme ao longo de uma circunferência.*
Circular plaste with a central hole loads along a circle by a unformly distributed radial moment.

53 — M. L. H. GREEN — *Two conferences on organometalic compounds.*
Duas conferências sobre compostos organometálicos.

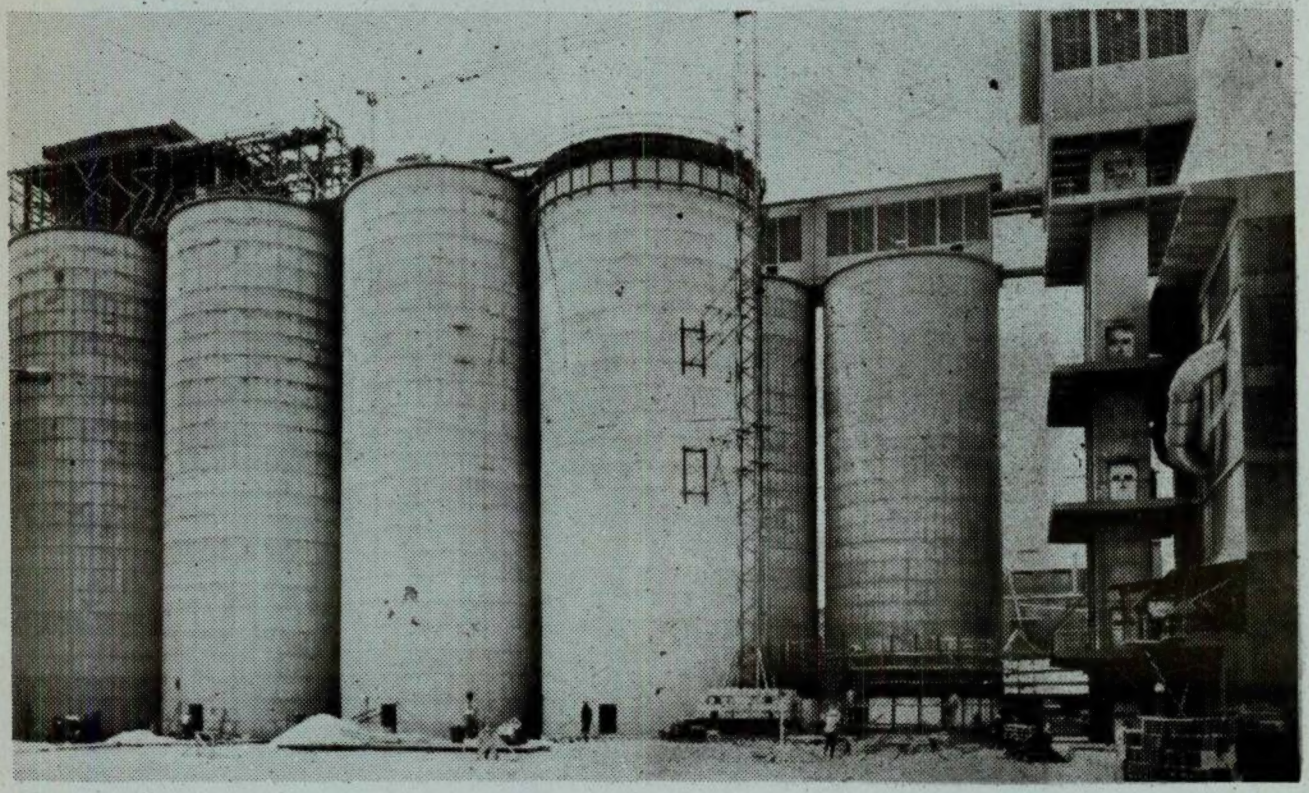
59 — BIBLIOGRAFIA

CAPA — Processo de preparação de compostos contendo o grupo Mo — N — N (V. artigo de M. L. Green).

INDICE ALFABÉTICO DOS ANUNCIANTES

	Pág.
A. Johnson & Co (Portugal), Lda.	XXXIV
Aguiar & Melo, Lda.	XXXI
Cimento Secil	2.ª da capa
Companhia de Cimentos Brancos	VI
Construções Técnicas	XVII
Construções Schréder	XX
E. Pinto Basto e Comp. Lda.	XXV
EFACEC	XII
Eficex Kienzle	IV
Electro-Arco, Lda.	III
Empresa de Cimentos de Leiria	XXVI
Empresa Electro Cerâmica	XXXI
Empresa de Sondagens e Fundações Teixeira Duarte, Lda.	3.ª da capa
Empresa Técnica de Equipamentos Eléctricos	XI
Empresa Ultramarina de Sondagens e Fundações	XVI
Fanafel	XVI
Frapil	XV
Fundações Franki, Lda.	I
Guedes & Almeida, Lda.	IV
Harker Sumner	XXIV
Heliaço	2.ª da capa
Jayme da Costa, Lda.	XIX
Johann Keller	XIV
J. F. Azevedo e Silva	VII
J. Roma	V
Jomatel	XIV
Livros Técnicos	V e XXV
MAGUE	XIII
Mendes de Almeida	XIV e XXI
Mobil Oil	XVIII
Monteiro Gomes	XXXI
Novobra, Lda.	2.ª da capa
Páginas Amarelas	XXVII
Philips Portuguesa	XXIX
Pinhol, Gomes & Gomes, Lda.	XXVI
Romar	XXVI
Rotring	XXXII
Salvador Caetano	XXIII
SEPSA	V
Siemens	4.ª da capa
Soc. do Ar Líquido	XXIII e XXIX
Sociedade Portuguesa Cavan	VI
S. K. F. Lda.	XXII
Sondagens e Fundações A. Cavaco	II
Sondagens Ródio, Lda.	V
Sopecate	II
Standard Eléctrica	IX
Valadas, Lda.	XXV
Wild Portugal, Lda.	III

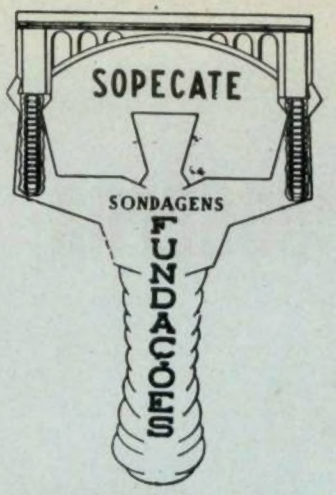
na base da construção moderna: estacas FRANKI, moldadas no solo.



A elevada gama de diâmetros das estacas Franki permite a melhor adaptação a cada problema concreto de fundações, desde a construção mais ligeira até à de grande concentração de cargas muito elevadas. Material permanentemente actualizado e pessoal com especialização constantemente aprofundada garantem a segurança, rapidez e economia das fundações executadas.

FRANKI

Consulte-nos: FUNDAÇÕES FRANKI, LDA. — PORTUGAL



sopecate

sondagens - fundações

ESCRITÓRIO: RUA DO ARSENAL 146 2.º TELEFONES 3 40 10 - 32 02 08 LISBOA

- ESTUDOS, PESQUISAS E CAPTAÇÕES DE ÁGUA
- SONDAGENS GEOLÓGICAS
- REBAIXAMENTO DE NÍVEIS AQUÍFEROS
- FUNDAÇÕES

SONDAGENS E FUNDAÇÕES A. CAVACO, LDA.

R. RODRIGO DA FONSECA. 62, R C ESQ. — LISBOA - 1
- TELEF. 56 11 71/72/73

ELECTRO-ARCO, L.DA

ELÉCTRODOS ✦ POSTOS ✦ ACESSÓRIOS
PARA A SOLDADURA ELÉCTRICA

✱

MATERIAL APROVADO PELOS
LLOYD'S REGISTER OF SHIPPING
BUREAU VERITAS
GERMANISCHER LLOYD

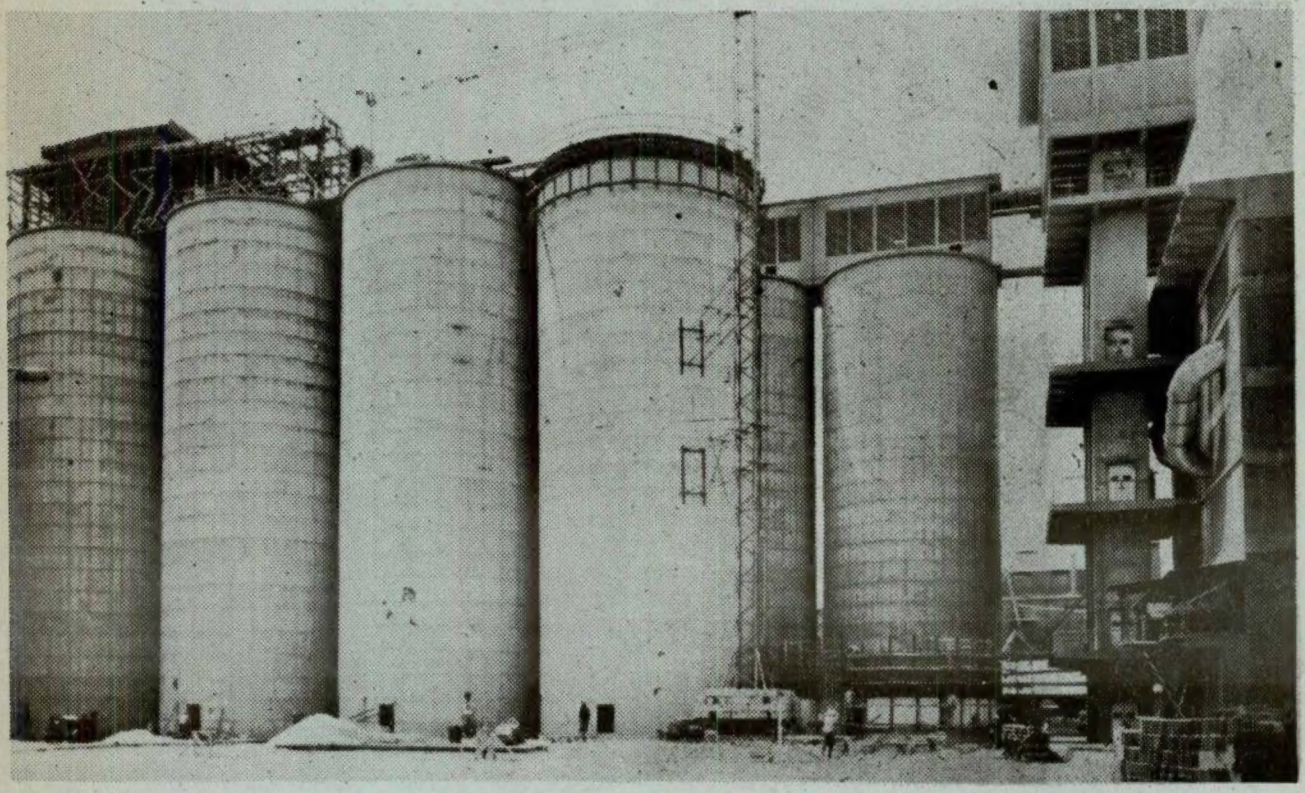
—

LISBOA
Rua Silva Carvalho, 239
Tels. 68 36 49 - 68 48 93

FÁBRICA E LABORATÓRIOS
Venda Nova — Amadora
Tels. 97 06 13 - 97 17 33

PORTO
Rua do Bolhão, 216
Tel. 2 12 77 - 39 44 73

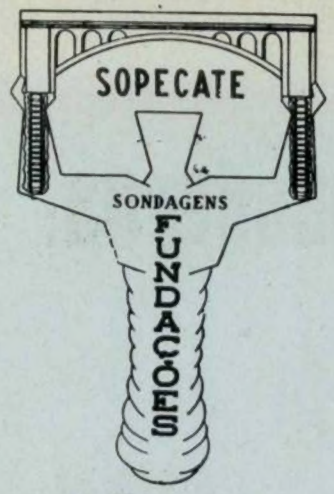
na base da construção moderna: estacas FRANKI, moldadas no solo.



A elevada gama de diâmetros das estacas Franki permite a melhor adaptação a cada problema concreto de fundações, desde a construção mais ligeira até à de grande concentração de cargas muito elevadas. Material permanentemente actualizado e pessoal com especialização constantemente aprofundada garantem a segurança, rapidez e economia das fundações executadas.

FRANKI

Consulte-nos: FUNDAÇÕES FRANKI, LDA. — PORTUGAL



sopecate

sondagens - fundações

ESCRITÓRIO: RUA DO ARSENAL 146 2.º TELEFONES 3 40 10 - 32 02 08 LISBOA

- ESTUDOS, PESQUISAS E CAPTAÇÕES DE ÁGUA
- SONDAGENS GEOLÓGICAS
- REBAIXAMENTO DE NÍVEIS AQUÍFEROS
- FUNDAÇÕES

SONDAGENS E FUNDAÇÕES A. CAVACO, LDA.

R. RODRIGO DA FONSECA. 62, R C ESQ. — LISBOA - 1
- TELEF. 56 11 71/72/73

ELECTRO-ARCO, L.DA

ELÉCTRODOS ✦ POSTOS ✦ ACESSÓRIOS
PARA A SOLDADURA ELÉCTRICA

✱

MATERIAL APROVADO PELOS
LLOYD'S REGISTER OF SHIPPING
BUREAU VERITAS
GERMANISCHER LLOYD

—

LISBOA
Rua Silva Carvalho, 239
Tels. 68 36 49 - 68 48 93

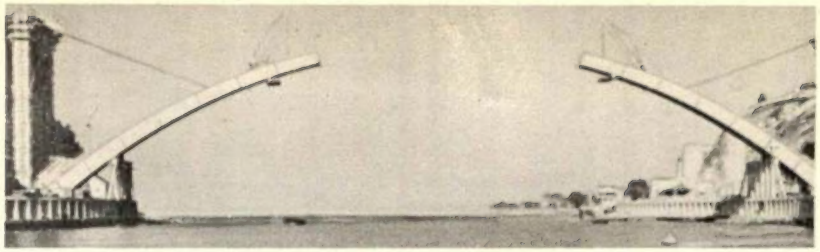
FÁBRICA E LABORATÓRIOS
Venda Nova — Amadora
Tels. 97 06 13 - 97 17 33

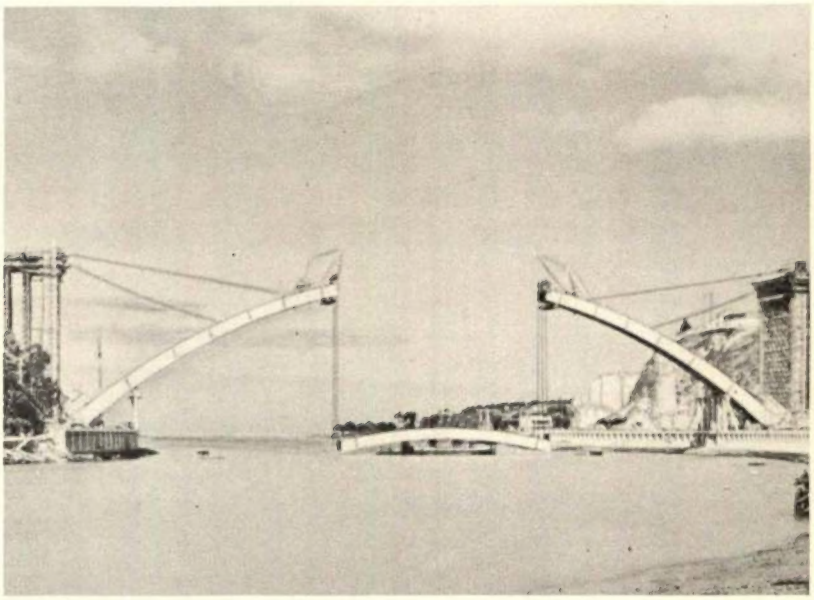
PORTO
Rua do Bolhão, 216
Tel. 2 12 77 - 39 44 73

Esforçamo-nos por estar na
primeira linha
do progresso industrial do país.
No mercado interno
orgulhamo-nos do nosso crescimento.
Com os olhos postos no Ultramar
e confiantes no futuro estamos
a colaborar com afinco no seu
desenvolvimento industrial

Sepsa SOCIEDADE DE CONSTRUÇÕES ELECTRO-MECÂNICAS, S.A.R.L.
APARTADO 8 * LEÇA do BAILIO * TELEX SEPSA P 2616

No início da década de 60,
fabricamos,
estudamos a montagem
e montamos, o cimbre
da Ponte da Arrábida



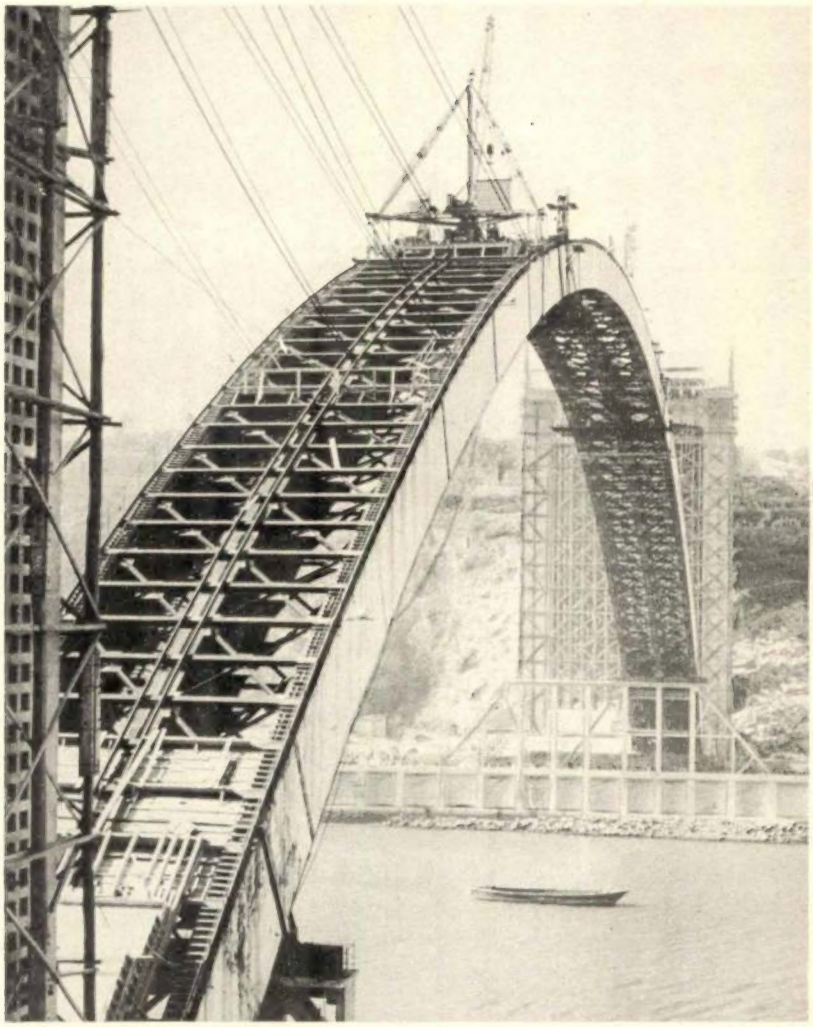


Entretanto, aumentamos

os nossos meios 5 vezes,

a nossa produção 8 vezes,

a nossa experiência "n" vezes



Na década de 70

estamos preparados

para ainda

maiores

realizações

Sepsa SOCIEDADE DE CONSTRUÇÕES ELECTRO-MECÂNICAS, S.A.R.L.
APARTADO 8 * LEÇA do BAILIO * TELEX SEPSA P 2616

Dimensionamento de Secções de Betão Armado em Relação à Rotura

Matérias

— Flexão simples de secções rectangulares simplesmente armadas
— Flexão simples de secções rectangulares duplamente armadas
a) com armadura de compressão reduzida
b) com armadura de tracção reduzida
— Flexão simples de secções T duplamente armadas
— Flexão simples de secções T duplamente armadas
— Compressão simples
— Flexão composta de secções rectangulares
a) com armadura simétrica
b) com armadura de tracção reduzida
c) com armadura de compressão reduzida
— Flexão composta desviada de secções rectangulares
— Flexão composta de secções em T
a) com armadura de tracção reduzida
b) comarmadura de compressão reduzida
— Flexão simples e flexão composta de secções circulares cheias
— Flexão simples e flexão composta de secções circulares ocas
— Esforço transverso

Preço 150$00

Dimensionamento de Secções Circulares de Betão Armado em Relação à Rotura

Matérias

— Flexão simples e flexão composta de secções circulares cheias
— Flexão simples e flexão composta de secções circulares ocas

Preço 60$00

Por J. M. MADEIRA COSTA
ENG.º CIVIL

À venda na TÉCNICA e nas LIVRARIAS

• SOLDADURA ELÉCTRICA

• MATERIAL DE PROTECÇÃO

Aparelhagem de medidas eléctricas

+ indicadora
+ reguladora
+ registadora

J. ROMA, L.DA

P. da Figueira, 12, 1.º LISBOA Tel. 865151
P. do Município, 309-6.º S/3 PORTO Tel. 0236732

SONDAGENS RODIO, LD.

R. S. Bento, 644 - 3.º LISBOA
PORTO
LUANDA
BEIRA

TELEFONE: 68 80 96

SONDAGENS GEOLÓGICAS
ESTUDOS GEOTÉCNICOS
CONSOLIDAÇÃO DE FUNDAÇÕES
ESTACAS
PAREDES CONTÍNUAS
IMPERMEABILIZAÇÃO DE OBRAS HIDRÁULICAS
CAPTAÇÃO DE ÁGUAS

RODIO

O EMPREGO DO CIMENTO BRANCO...

permite acabamentos mais perfeitos, mais duradouros e muito mais económicos

Estude a vantagem do emprego do

CIMENTO BRANCO LUSO

No Sul: **SCIAL** — T. do Corpo Santo, 15 — Telef. 32 73 77 — Lisboa

No Norte: **SCIAL** — R. António Feliciano de Castilho, 1126 — Telef. 97 09 32 — Areosa — Porto

POSTES DE BETÃO PARA LINHAS ELÉCTRICAS

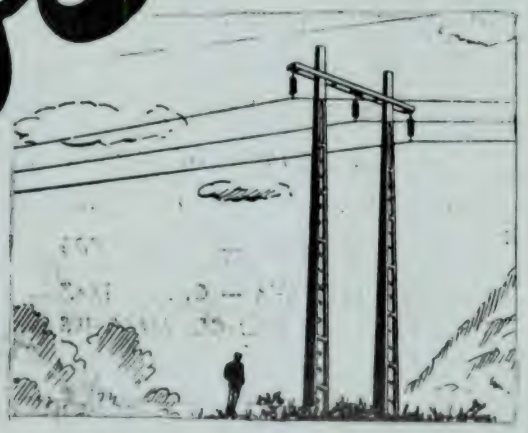
MOSAICOS E AZULEJOS

COLUNAS PARA ILUMINAÇÃO PÚBLICA

MANILHAS PARA ESGOTOS

SOCIEDADE PORTUGUESA

Carvam



AV. VISCONDE VALMOR, 76 - 1º LISBOA - 1 - TELEF. 766014 (7 linhas)

Colaborou num dos maiores empreendimentos Hoteleiros até hoje realizados em Território Português como adjudicatário da empreitada de

PROJECTOU E EXECUTOU TODA A INSTALAÇÃO ELÉCTRICA,

compreendendo:

Posto de transformação de 1430 k VA; Central de emergência de 250 k VA; Quadro Geral e quadros parciais, Instalação de iluminação; Tomadas, Força Motriz e Ar Condicionado; Instalação de Tubagem, condutores e caixas de rede telefónica; Instalação de tubagem, condutores e caixas de rede de som.

Executou ainda as instalações de: Alarme de incêndios; Televisão; Procura de pessoas; Letreiro luminoso; Protecção contra descargas atmosféricas;

Iluminação Geral, Decorativa e de Efeitos Especiais.

Forneceu 90 % do material de iluminação das suas representadas:

FAGERHULTS Armaduras decorativas

LITA Armaduras decorativas e para rail electrificado

OY NOKIA AB Rail electrificado trifásico

AHLSTRÖM Aparelhagem para instalações

K LITE Difusores prismáticos

Bem como todos os Quadros fabricados na nossa oficina

JF

J.F. DE AZEVEDO E SILVA & Cª LDA

Rua S. Francisco de Sales, 2-1º, Tel. 654165-Lisboa

WABCO
An American-Standard Company

MOTO-SCRAPERS AUTO-CARREGADORES

CAPACIDADES ATÉ 34 JARDAS CÚBICAS

NÃO NECESSITA DE TRACTOR PARA EMPURRE!
UMA SÓ MÁQUINA... UM SÓ OPERADOR...

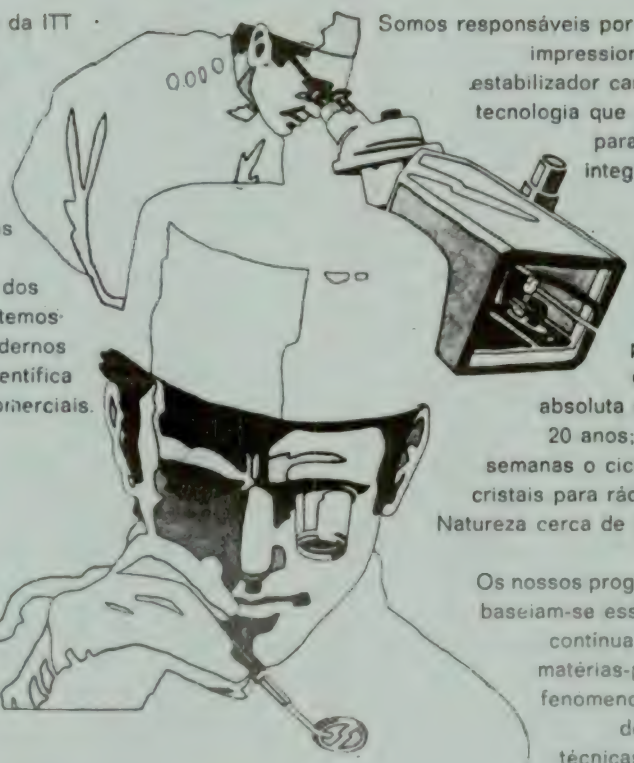
DISTRIBUIDOR EXCLUSIVO

GUEDES & ALMEIDA LDA.

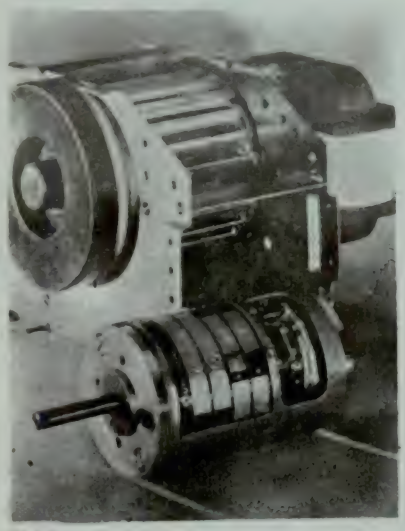
Rua Áurea, 181-2.º — LISBOA-2 — TELEFS. 32 50 80 e 32 78 45

A maior rede de especialistas na Europa antecipa-se aos seus problemas

O Grupo de Componentes da ITT Europa tem uma ambição: Não permitir a interrupção da actividade dos seus clientes por falta de componentes
Conhecendo em todo o pormenor as caracteristicas dos mercados podemos antecipar-nos à resolução dos seus problemas. Por isso temos na Europa Ocidental 4 modernos centros de investigação cientifica que apoiam as divisões comerciais.



Somos responsáveis por alguns resultados impressionantes: O primeiro estabilizador cardiaco baseado na tecnologia que a ITT desenvolveu para os seus circuitos integrados; a produção de amplificadores para cabos submarinos que, submersos a grandes profundidades, têm que funcionar com absoluta segurança durante 20 anos; reduzimos para 3 semanas o ciclo de produção de cristais para rádio o que levaria à Natureza cerca de 3 milhões de anos a conseguir.
Os nossos programas de pesquisa baseiam-se essencialmente numa continua procura de novas matérias-primas e de novos fenomenos fisicos, base do desenvolvimento de técnicas e processos que levam ao aparecimento de novos componentes.



Exemplos de componentes ITT

São estes motores e ventiladores largamente usados em aplicações tais como: máquinas de executivo, gravadores de fita magnética, aparelhagem doméstica, projectores, aquecedores de água, sistemas de ventilação e refrigeração, etc.
A gama de motores ITT está prevista para operação unifásica ou trifásica com potências nominais de 0,7 a 78 W. As potências dos motores de corrente continua vão desde 0,25 a 25 W. Existem ainda modelos acoplados a redutores de velocidade.

Para informações completas dirija-se a:
STANDARD ELÉCTRICA, S. A. R. L.
Divisão ITT de Vendas de Componentes
Av. da República, 60, 2.°-D.
Lisboa 1
Telef. 765491

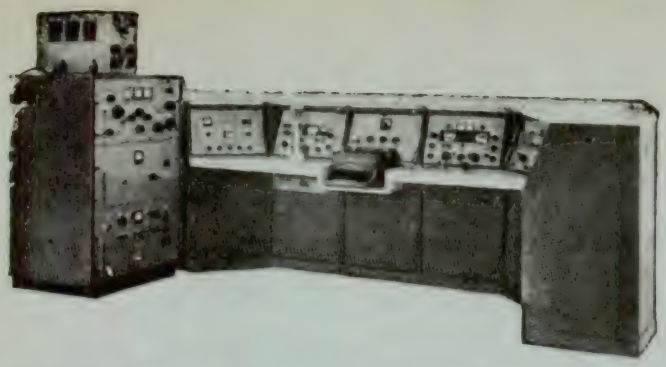
COMPONENTES **ITT**

71/D

EMPREZA DE CIMENTOS DE LEIRIA, S. A. R. L.

LISBOA - Telefones: 31 30 31 - 31 30 32 - 31 17 96 • PORTO - Telefones: 95 13 23/24

TÉCNICA X



Comunicações

equipamentos
e sistemas completos

- Cuidadosamente projectados
- Amplamente experimentados
- Completamente integrados

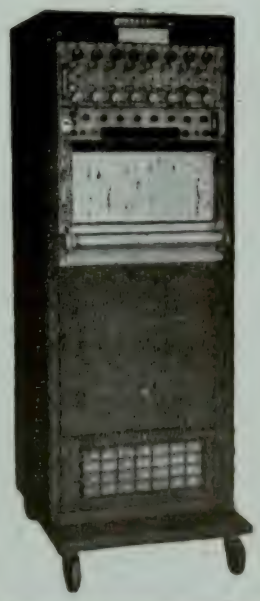
THE TECHNICAL MATERIEL CORPORATION

HEWLETT hp PACKARD

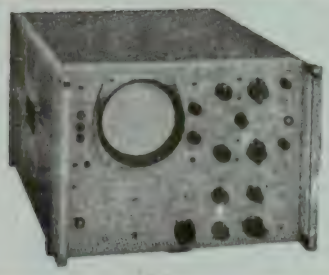
aparelhagem electrónica de medida e registo

Osciloscópios, Oscilógrafos, Voltímetros electrónicos, Geradores de sinal, Contadores electrónicos, Registadores digitais, Fontes de alimentação

Registador Sanborn



Registador digital Dymec



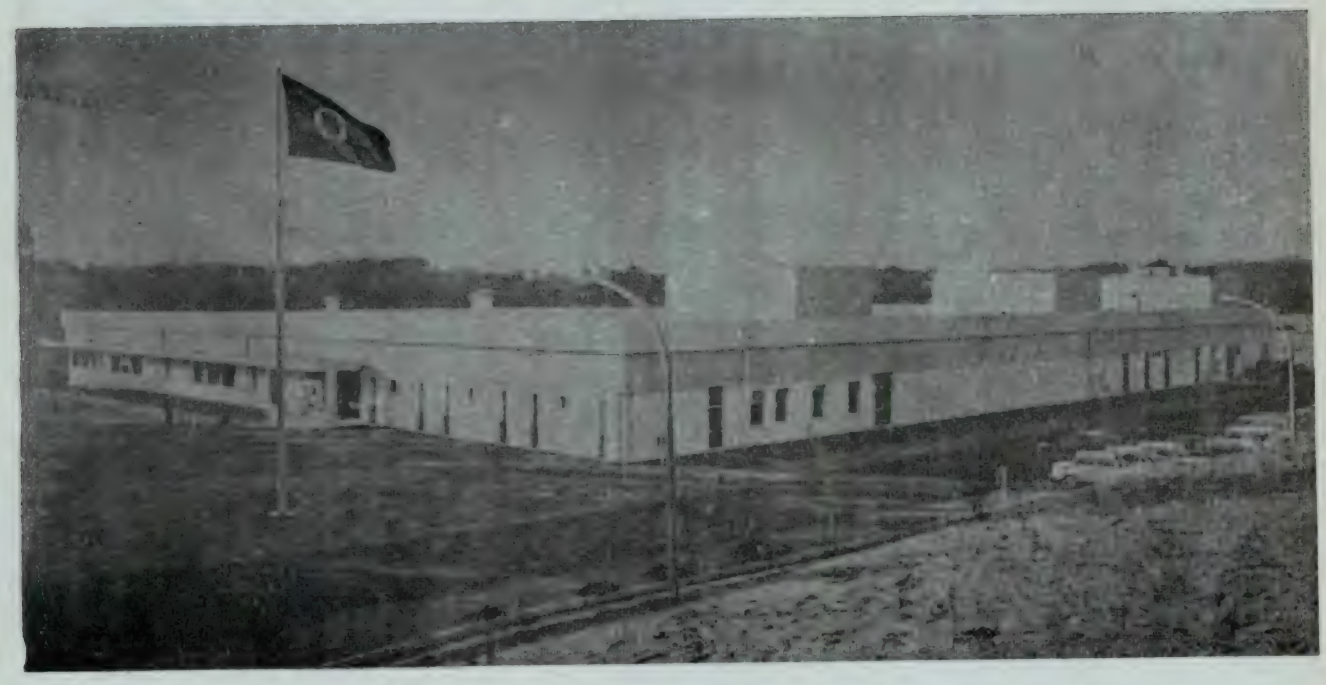
Osciloscópio HP

Contador Electrónico HP

TELECTRA EMPRESA TECNICA DE EQUIPAMENTOS ELECTRICOS, S.A.R.L.

EFACEC

estudo projecto e realização de instalações eléctricas industriais



TMX — Portugal, Lda., Fábrica de Relógios TIMEX

Instalação Eléctrica Geral, de Iluminação, Força Motriz. Comando e Controle e Central de Emergência foram estudadas, projectadas e realizadas pela EFACEC

A MAIOR ORGANIZAÇÃO DO PAÍS NO RAMO ELECTROTÉCNICO

técnica

NÚMERO 411 OUTUBRO DE 1971 ANO XLVI VOLUME XXXIV PUBLICAÇÃO MENSAL

EDITORIAL

Não tem ùltimamente sido um hábito nesta revista a presença de editoriais. Isso surge como um mal pois um editorial é sempre uma oportunidade de a redacção da revista contactar com os seus leitores, expor os problemas, apresentar as soluções, ventilar as ideias. E, por vezes, o editorial deixa de ser um monólogo para ser motivo de diálogo e de troca de impressões que é de desejar, por útil.

O reaparecimento do «Editorial» — se não em todos os números — em alguns deles, foi um dos pontos que a equipa que actualmente dirige a Técnica sempre teve em vista e só não pode concretizar mais cedo porque os afazeres que outros sectores lhe exigiam já ultrapassam o tempo disponível, que teve que se alargar por isso mesmo.

Tornou-se, neste momento oportuno o aparecimento do Editorial. Pois ele surgiu. Esperemos que continue.

Vai aparecer este número com um atraso ainda maior que o tradicional. Achamos justo tentar acabar com esta tradição e explicar a razão deste agravamento.

A principal causa foi uma mudança de oficinas gráficas que ocasionou negociações que se prolongaram durante algum tempo. Por outro lado, também não está a nova oficina ainda «engrenada» no trabalho da revista, o que origina alguns atrasos.

Uma modificação que se torna óbvia com a leitura da primeira página é o aparecimento do Conselho Redactorial.

Este orgão — puramente consultivo — surge, não tanto pela necessidade de se «seleccionar o bom do mau», mas sobretudo para aconselhar, aos autores, modificações de determinados aspectos ou orientações de exposição dos seus artigos, que os tornem mais coerentes com as grandes linhas que se seguem no I. S. T., pois não esqueçamos que a «Técnica» é um dos orgãos da A. E. I. S. T., ou que os dirijam a grupos mais específicos para quem haja vantagem em orientar a exposição (alunos, pós-graduados, assistentes, etc).

Repare-se que isto não significa uma espécie de censura científica, mas sobretudo uma orientação que reputamos de útil e que poderá ser ou não ser seguida.

Dissemos atrás que quase não havia necessidade de «seleccionar o bom do mau». É a experiência de colaboradores e leitores da revista

que nos diz que, de um modo geral, os artigos que chegam à revista — se bem que susceptíveis de serem dirigidos a diferentes grupos raramente são considerados maus artigos.

No entanto a presença de um Conselho Redactorial também aí irá apresentar as suas vantagens e ser uma garantia para os leitores.

A escolha das pessoas que fazem parte (ou irão fazer num futuro próximo) do Conselho Redactorial e que não ficou restrita ao I. S. T., foi feita por forma a ter, dentro do possível, um grupo dinâmico fugindo aos possuidores da ciência feita e assentada em pessoas que mantenham ainda uma inquietação fecunda e profícua.

Se bem que desde o ano passado venham a ser realizadas experiências com o Conselho Redactorial ainda não temos neste momento a fórmula perfeita de funcionamento e, por outro lado existe forçosamente um período de adaptação. Por isso o Conselho Redactorial não é assunto arrumado e a ele pensamos voltar.

Em resumo a Técnica iniciou um período de transformações que poderão ser mais ou menos profundos, conforme o apoio — sob todas as formas — que tivermos ou não, tendentes a levá-la para uma forma mais viva e actuante abandonando figurinos já cansados e abrindo as páginas a novas formas de ser revista. Já muitos projectos fervilham nas gavetas mas existem sempre muitos «mas». Importa ultrapassá-los.

AOS NOSSOS ASSINANTES

Para poder suportar o rápido aumento do custo de vida que se tem verificado e que, para nós se reflecte em agravamentos bastante pronunciados, vemo-nos forçados a alterar a Tabela de Preços.

A nova tabela é a que se segue e entra em vigor a partir deste número, o n.º 411, relativo a Outubro de 1971.

Esperamos a continuidade da vossa compreensão.

ASSINATURAS:	5 nos.	10 nos.
— Continente e Ilhas	90$00	180$00
— Ultramar, Brasil e Espanha	100$00	190$00
— Estrangeiro	—	200$00
— Número avulso	25$00	—

C. D. U. 627.82.001.57: 624.042.5

DETERMINAÇÃO DE TENSÕES TÉRMICAS EM BARRAGENS DE BETÃO POR MEIO DE ENSAIOS EM MODELO (*)

por MANUEL ROCHA
Director do LNEC

A. F. da SILVEIRA
Engenheiro Civil, Investigador, Chefe do Serviço de Barragens do LNEC

RESUMO

Os autores descrevem as técnicas utilizadas actualmente pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) para determinação do estado de tensão em barragens de betão devido a variações de temperatura. São apresentados como exemplo alguns dos resultados obtidos, assim como fotografias da aparelhagem e instalações utilizadas.

As conclusões referem que os resultados obtidos têm precisão suficiente para as aplicações, aconselhando a realização de tais ensaios em todas as circunstâncias em que se preveja o aparecimento de tensões de origem térmica de certa importância.

SYNOPSIS

The authors describe the methods in present use at the Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) for determining the state of stress due to temperature changes in concrete dams, and present as illustrations some of the results obtained, as well as photographs of the instruments and setups used.

According to the conclusions, the results are sufficiently accurate for practical applications, and these tests should be carried out whenever fairly important thermal stresses are anticipated.

1 – INTRODUÇÃO

O Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) tem vindo, desde há cerca de 10 anos, a ocupar-se do problema da determinação experimental das tensões em barragens de betão devidas às variações de temperatura. Em vários trabalhos já publicados [1], [2], [3] tem o LNEC exposto as técnicas utilizadas e alguns resultados. No entanto, ùltimamente foram introduzidos alguns melhoramentos nas técnicas empregadas, pelo que se considera de interesse a sua apresentação neste trabalho, aproveitando-se a oportunidade para referir novos resultados recentemente obtidos.

É geralmente admitido que tem interesse a utilização de métodos experimentais para determinação das tensões em barragens de betão devidas às variações de temperatura, apesar das limitações que ainda pesam sobre os métodos experimentais. Com efeito, a determinação analítica das tensões térmicas em barragens de betão está ainda longe de conduzir a resultados precisos pois, por um lado, é difícil definir analìticamente as soli-

(*) Trabalho apresentado ao «Symposium on Models for Concrete Structures», Março 1968, Los Angeles, Calif. USA. Publicação SP-24-ACI. Detroit, Michig. USA.
Artigo recebido na redacção em 19-1-971

citações térmicas, e, por outro lado, é difícil determinar o estado de tensão correspondente, mesmo que se soubesse definir com precisão a solicitação térmica. Alguns cálculos analíticos que habitualmente se realizam introduzem hipóteses simplificativas, quer no que se refere à solicitação, quer no que se refere à estrutura ou ainda ao comportamento do material. Verdade seja que os métodos experimentais também não resolvem completamente o problema. Com efeito, é difícil, se não mesmo impossível, a reprodução de algumas das solicitações térmicas e do comportamento do material. Este, nas condições em que os ensaios são realizados, comporta-se como perfeitamento elástico, enquanto que, no protótipo, podem surgir efeitos de tempo importantes, amplificados mesmo pela própria solicitação térmica. Apesar de tudo, considera-se que, no estado actual de conhecimento, é de grande interesse a realização de estudos experimentais para determinação das tensões de origem térmica em barragens de betão.

2 — SOLICITAÇÕES TÉRMICAS CONSIDERADAS

A temperatura duma barragem depende dos métodos de construção, das condições climáticas do local da obra e das propriedades dos materiais. Até agora só tem sido possível abordar por métodos experimentais a determinação das tensões devidas a choques térmicos, às variações uniformes da temperatura da estrutura e às variações periódicas mas de período igual a 1 ano — ondas anuais de temperatura. Com efeito, as ondas de períodos iguais a 1 dia e 15 dias normalmente consideradas são de muito difícil reprodução, devido às pequeníssimas escalas de tempos que resultam do emprego de moldes às escalas habituais. Quanto às solicitações térmicas que se desenvolvem durante a construção, embora a sua consideração seja importante, não tem sido possível, até agora, introduzi-las em estudos experimentais, devido à dificuldade de reproduzir as condições térmicas e as propriedades mecânicas dos materiais que, nessa fase da vida da obra, estão muito longe da elasticidade perfeita.

A técnica até agora desenvolvida no LNEC para imposição de temperaturas aos modelos permite a aplicação de:

a) choques térmicos;
b) variações uniformes de temperatura;
c) gradiantes de temperatura em regime permanente entre os dois paramentos;
d) ondas aproximadamente sinusoidais de período correspondente a 1 ano.

Nos estudos efectuados no LNEC para determinação das tensões devidas a ondas de temperatura de período igual a 1 ano e referidas adiante, adoptaram-se as seguintes condições nos limites:

a) Nas faces de montante e jusante acima da linha de água, onda anual de temperatura obtida a partir das temperaturas médias mensais. Esta onda pode ser considerada aproximadamente sinusoidal, com o período de 1 ano, variando em torno da temperatura média anual da face.
b) Na face de montante abaixo da linha da água, temperatura média anual da face decrescendo com a profundidade — onda anual da temperatura da face, em regra, desfasada da onda na face de jusante — de amplitude também decrescente com a profundidade.

3 — CONDIÇÕES DE SEMELHANÇA

Admitindo que a barragem é um sólido mecânica e tèrmicamente homogéneo, perfeitamente elástica e, além disso, que as propriedades mecânicas e térmicas do material de que é constituída não variam com a temperatura, devem ser satisfeitas as seguintes condições:

a) O modelo deve ser uma reprodução fiel do protótipo, a uma certa escala, e o seu material deve ser mecânica e tèrmicamente homogéneo e isotrópico.
b) Os coeficientes de dilatação térmica (α_m) e de difusibilidade térmica (h^2_m) do modelo não devem variar com a temperatura. O módulo de elasticidade (E_m) do modelo deve ser constante não va-

riando com a temperatura, nem com o tempo, nem com a tensão. Os coeficientes de Poisson do material do modelo e do material do protótipo devem ter o mesmo valor.

c) A fundação deve ser reproduzida até uma profundidade tal que seja lícito considerá-la como um sólido semi-indefinido em relação ao modelo. Além disso, o material que reproduz a fundação deve ter propriedades térmicas e mecânicas na mesma relação com as do material da barragem, que ocorre no protótipo.

d) As distribuições da temperatura no modelo (θ_m) e no protótipo (θ_p) devem ser homólogas, isto é, as temperaturas devem ser proporcionadas no modelo e no protótipo em cada ponto e em cada instante.

As relações de semelhança a ser usadas nos ensaios térmicos, deduzidas das equações gerais da Teoria da Elasticidade, são as seguintes:

$$(\varepsilon_{ik})_p = K_\alpha \, K_\theta \, (\varepsilon_{ik})_m \qquad (1)$$

$$(\sigma_{ik})_p = K_E \, . K_\alpha \, . K_\theta \, (\sigma_{ik})_m \qquad (2)$$

$$(u_i)_p = K_\alpha \, . K_\theta \, . K_x \, (u_i)_m \qquad (3)$$

$$t_p = \frac{K_x^2}{K_h^2} \, t_m \qquad (4)$$

em que:

$(\varepsilon_{ik})_p$ e $(\varepsilon_{ik})_m$ — componentes normal e tangencial do tensor extensão no protótipo e no modelo

$(\sigma_{ik})_p$ e $(\sigma_{ik})_m$ — componentes normal e tangencial do tensor tensão no protótipo e no modelo

$(u_i)_p$ e $(u_i)_m$ — componentes do vector deslocamento no protótipo e no modelo

t_p e t_m — tempos no protótipo e no modelo

K_α — relação entre os coeficientes de dilatação térmica no protótipo e no modelo

K_θ — relação entre as variações de temperatura no protótipo e no modelo

K_E — relação entre os módulos de elasticidade no protótipo e no modelo

K_x — relação entre uma distância medida no protótipo e a distância correspondente no modelo

K_h^2 — relação entre as difusibilidades térmicas no protótipo e no modelo.

No Quadro I apresentam-se os valores das relações de semelhança relativos a um ensaio em modelo.

QUADRO I

VALORES DAS RELAÇÕES DE SEMELHANÇA

	RELAÇÕES K	MODELO I	MODELO II
VALORES USADOS PARA O CÁLCULO DAS RELAÇÕES DE SEMELHANÇA	K_h^2	3,8439	3,6928
	K_α	0,7984	0,7795
	K_θ	0,8682	0,9507
	K_x	400	400
	K_E	10,0000	12,0480
RELAÇÕES DE SEMELHANÇA	K_t	41624	43328
	K_ε	0,6932	0,7411
	K_σ	6,9320	8,9290
	K_δ	277,28	296,44

4 — MATERIAIS E ESCALAS DOS MODELOS

Nos primeiros estudos efectuados no LNEC foram usados modelos de alkathene e de microbetão [3]. No entanto, a longa experiência do LNEC no uso de modelos de gesso e diatomite para estudos experimentais de barragens submetidas a outras

solicitações, tais como pressão hidrostática, peso próprio, rotura, sismos, etc., levou a pensar na sua utilização também nos ensaios térmicos, desde que as propriedades térmicas fossem adequadas. Com efeito, as propriedades térmicas revelaram-se favoráveis, tendo sido decidido utilizar modelos a escalas iguais às dos modelos utilizados nos outros ensaios. Na fig. 1 pode ver-se um dos modelos empregados nos ensaios térmicos. Este modelo está à escala 1/400 e é constituído por gesso (G), diatomite (D) e água (A) nas seguintes porções em peso: $\frac{A}{G} = 1{,}5$ e $\frac{G}{D} = 3$. A fim de verificar os resultados, são sempre ensaiados dois modelos iguais

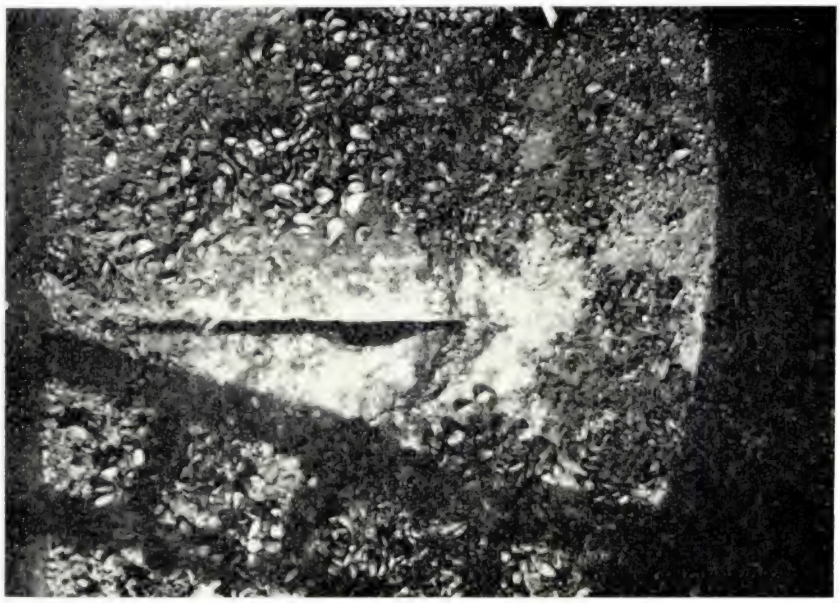


Fig. 1

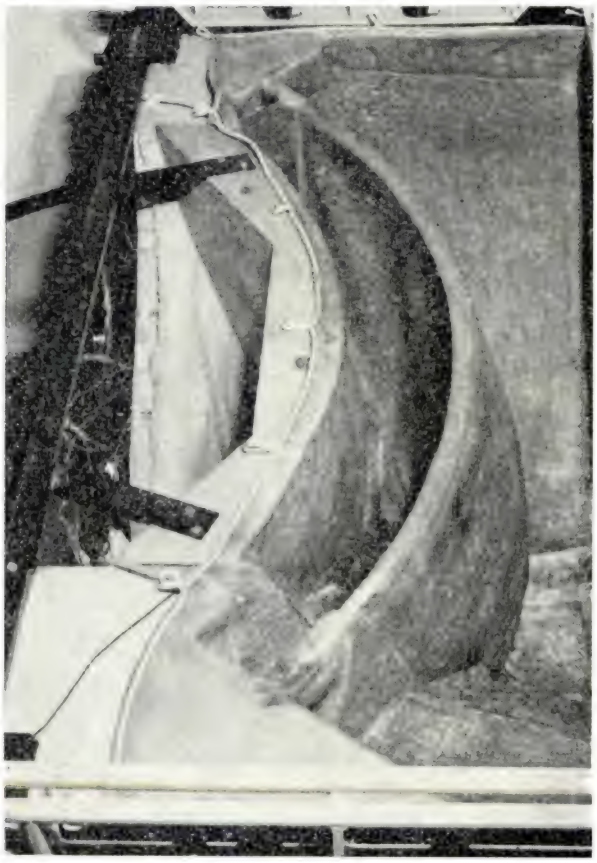


Fig. 2

5 – SISTEMA DE APLICAÇÃO DE CARGAS

O modelo é mergulhado em dois banhos de água, contida em dois reservatórios, um a montante e o outro a jusante (Fig. 2), que são submetidos às variações de temperatura escolhidas.

Para se poderem usar os modelos de gesso, os extensómetros eléctricos e os pares termoeléctricos no banho de água, é necessário assegurar uma eficaz impermeabilização, inalterável sob a temperatura e no tempo e com uma resistência mecânica apropriada. O material escolhido para este fim é borracha vulcanizável a frio, aplicada por meio de pintura nas superfícies interiores

dos reservatórios, em várias camadas. Foi assim possível obter um saco impermeável e contínuo, em íntimo contacto como o modelo, sem bolhas de ar aprisionado, que não perturba o comportamento mecânico do modelo.

A temperatura do banho de água é regulada por meio de água quente e fria que se faz circular em serpentinas. Estas serpentinas são constituídas por tubos flexíveis de cobre, fixados numa grade de aço. A grade de jusante tem a forma do paramento de jusante da barragem e a grade de montante a forma da superfície livre do reservatório de montante. As serpentinas são providas de várias entradas e saídas simètricamente colocadas, de modo a facilitar as trocas de calor e a aumentar o gradiante térmico (Fig. 3).

Umas das serpentinas é colocada paralelamente e junto do paramento de jusante, enquanto que a montante, onde a distribuição da temperatura é diferente e depende da profundidade, a serpentina é colocada horizontalmente à superfície do banho de água. A água dos banhos do montante e de jusante é agitada por meio de agitadores de hélice devidamente localizados. Deste modo é possível realizar as condições térmicas referidas em 2.

O sistema de aplicação da solicitação térmica consta de fontes quente e fria materializadas por quatro tanques com uma capacidade total de 3600 litros e bombas para bombarem a água para os circuitos. A fonte quente é aquecida com resistências eléctricas, munidas de um termóstato que, em conjugação com um agitador, mantém a temperatura constante e uniforme. A fonte fria é munida de um sistema de refrigeração com termóstato que mantém a água a baixas temperaturas.

6 — APARELHAGEM DE MEDIDA. MEDIÇÕES E ENSAIOS

A finalidade dos ensaios é a determinação das extensões principais devidas às variações de temperatura aplicadas aos modelos. As extensões são medidas com extensómetros eléctricos Baldwin tipo A7 e as temperaturas com pares termoeléctricos de cobre-constantan.

Fig. 3

De acordo com a Teoria da Elasticidade, as extensões produtoras de tensões num corpo homogéneo, isotrópico e elástico submetido a variações de temperatura são dadas por

$$\varepsilon_{ik} = \bar{\varepsilon}_{ik} - \alpha \Delta \theta \delta_{ik} \qquad (5)$$

em que

$\bar{\varepsilon}_{ik}$ — componentes normal e tangencial

do tensor extensão num dado ponto

α — coeficiente de dilatação térmica do material

$\Delta\theta$ — variação de temperatura sofrida pelo material no ponto

δ_{ik} — símbolo de Kronecker.

De acordo com a expressão (5), ε_{ik} poderia ser obtido a partir do conhecimento dos valores de α e $\Delta\theta$ desde que se medisse o valor $\bar{\varepsilon}_{ik}$ com os extensómetros. Não é, porém, esse o caso, devido à influência directa da temperatura sobre o extensómetro eléctrico. Podem usar-se dois métodos para vencer a dificuldade — calibração ou compensação [3].

Actualmente está a usar-se o método de calibração no LNEC: determina-se para o tipo de extensómetro e material usados a relação $\varepsilon'_{ik} / \Delta\theta$, em que ε'_{ik} é o valor da extensão e $\Delta\theta$ é a variação de temperatura, medidas num espécime do material livre de se deformar, sendo o extensómetro compensador colado num espécime do mesmo material mantido a temperatura constante. Em regra a expressão

$$\varepsilon'_{ik} = K\,\Delta\theta$$

é linear, isto é, K é constante (constante de calibração).

A fig. 4 representa a curva de calibração média obtida a partir de dez extensómetros, colados em espécimes do mesmo material do modelo, sendo os extensómetros da mesma marca e tipo dos usados nos ensaios dos modelos.

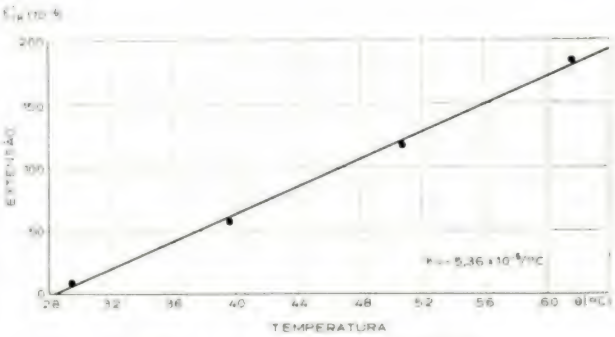


Fig. 4 — Curva de calibração

As extensões são lidas com um indicador Brüel & Kjaer e registadas num registador do mesmo fabricante. A comutação dos vários extensómetros é efectuada por um circuito de comutação e igualização. Todos estes instrumentos são devidamente protegidos por uma caixa de plástico e podem ver-se na fig. 5.

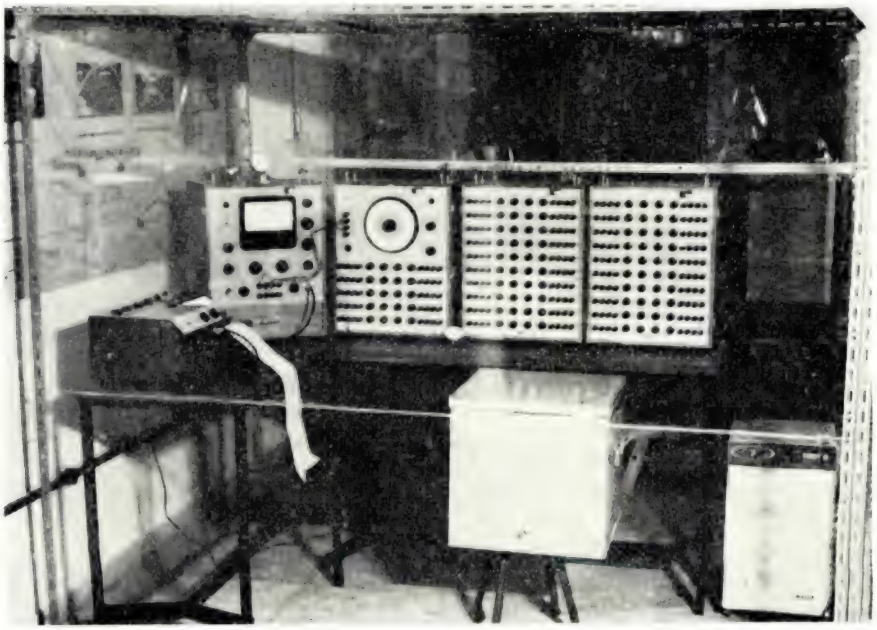


Fig. 5

Uma vez conhecido o valor de ε'_{ik}, calcula-se $\varepsilon_{ik} = \varepsilon''_{ik} - \varepsilon'_{ik}$ em que ε''_{ik} é a extensão medida num dado ponto do modelo.

As temperaturas foram registadas num registador Honeywell e em dois registadores AEG, que se podem ver na fig. 6.

Em regra, são aplicados em cada modelo sete ciclos de temperatura e as extensões tomadas são a média dos valores ε''_{ik} lidos nos quatro últimos ciclos. As dispersões dos diferentes valores médios são, em geral, pequenas, o que confirma que o fluxo calorífico se torna periódico a partir do terceiro ciclo. Na

Fig. 6

Como exemplificação, apresenta-se na fig. 7, a localização dos extensómetros e dos pares termoeléctricos num modelo.

fig. 8, apresentam-se os diagramas de temperaturas e extensões nos pontos 5 e 15 (Fig. 7), correspondentes a um dos ciclos referidos.

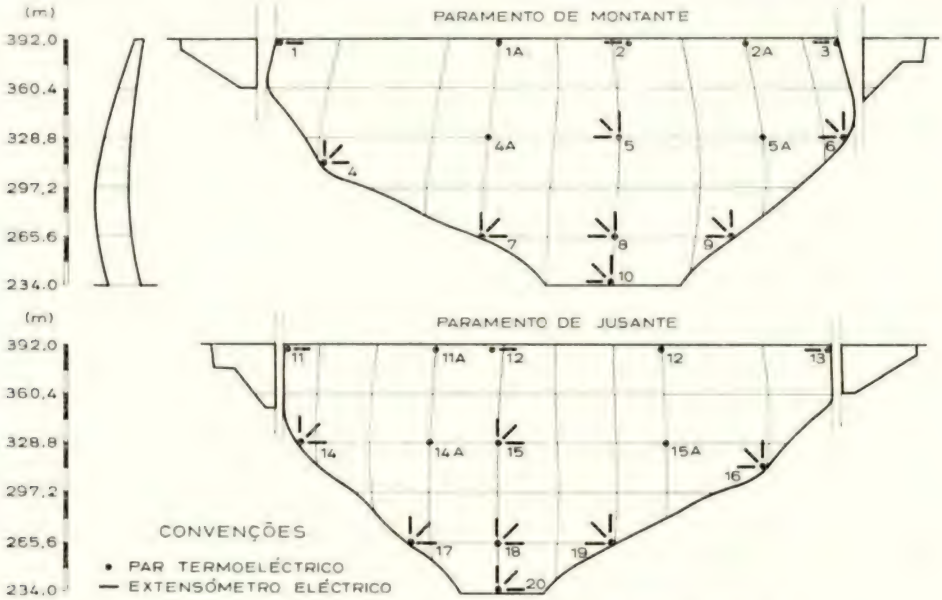


Fig. 7 — Plano de extensómetros e pares termoeléctricos

7 – PROPRIEDADES MECÂNICAS E TÉRMICAS DOS MATERIAIS DOS MODELOS

As propriedades mecânicas do material dos modelos são determinadas a partir do ensaio de 6 prismas de 6 cm × 6 cm ×16 cm. As superfícies dos prismas são preparadas da mesma maneira que os paramentos dos modelos e são aplicados em cada ponto extensómetros eléctricos Baldwin SR4 tipo A7, em direcção longitudinal e transversal. Os prismas são submetidos a vários ciclos de carga e descarga, que crescem gradualmente de zero até à carga máxima correspondente a uma compressão uniforme de 3 kgf/cm2, e as extensões são medidas. A partir dos valores medidos nas diferentes séries de ensaios de cada prisma, traçam-se os diagramas das extensões em função das tensões aplicadas. A partir destes diagramas, determinam-se por métodos gráficos os valores do módulo de elasticidade e do coeficiente de Poisson. No Quadro II apresentam-se os valores obtidos para dois dos modelos ensaiados. Este quadro contém os valores do módulo de elasticidade e do coeficiente de Poisson usados nos cálculo das tensões em cada modelo, e que são dados pela média dos valores obtidos nos ensaios dos prismas.

QUADRO II

PROPRIEDADES MECÂNICAS DO MATERIAL DOS MODELOS (MISTURA DE GESSO (G), DIATOMITE (D) E ÁGUA (A) NAS PROPORÇÕES: $\frac{A}{G} = 1{,}5$; $\frac{G}{D} = 3$)

MODELO	PRISMA	Módulo de elasticidade (kgf/cm²)		COEFICIENTE DE POISSON
		Extensómetros eléctricos tipo A7		
		Valores individuais	Valores médios	
I	1	19 290	20 000	0,22
	2	19 300		
	3	19 890		
	4	18 750		
	5	22 430		
	6	20 340		
II	1	16 670	16 600	0,19
	2	16 670		
	3	17 820		
	4	16 780		
	5	16 360		
	6	15 300		

QUADRO III

DIFUSIBILIDADE TÉRMICA DO MATERIAL DOS MODELOS (MISTURA DE GESSO (G), DIATOMITE (D) E ÁGUA (A) NAS PROPORÇÕES: $\frac{A}{G} = 1{,}5$; $\frac{G}{D} = 3$)

Modelo	Espécime cilíndrico	DIFUSIBILIDADE TÉRMICA (cm²/s)					
		Ensaio de aquecimento		Ensaio de arrefecimento		Valores médios do espécime cilíndrico	Valor médio
		Condição A	Condição B	Condição A	Condição B		
I	1	0,00320	0,00292	0,00290	0,00249	0,00288	0,00269
	2	0,00278	0,00260	0,00258	0,00244	0,00260	
	3	0,00278	0,00260	0,00258	0,00244	0,00260	
II	1	0,00295	0,00287	0,00259	0,00253	0,00274	0,00281
	2	0,00312	0,00291	0,00235	0,00240	0,00270	
	3	0,00312	0, 00309	0,00289	0,00279	0,00297	

MAGUE

Ponte rolante eléctrica de 220t-7,5t/18,75 m fornecida à ENDESA - Empresa Nacional de Electricidad, S.A., Chile

(ensaios em fábrica)

PONTES ROLANTES, GUINDASTES E APAR. DE ELEVAÇÃO ESPECIAIS	*Projecto e fabrico*
TURBINAS HIDRÁULICAS	*Fabrico segundo licença de A. C. M. de Vevey, S. A.*
TURBINAS A VAPOR	*Fabrico segundo licença de Brown Boveri, Cie.*
CALDEIRAS A VAPOR	*Projecto e fabrico segundo licença de Foster Wheeler, Co.*
EQUIPAMENTOS E INSTALAÇÕES INDUSTRIAIS	

CONSTRUÇÕES METALOMECANICAS **MAGUE** S.A.R.L

ALVERCA DO RIBATEJO — PORTUGAL

A utilização de betão pronto impôs-se
ao dono da obra,
ao técnico responsável
e ao empreiteiro
porque garante qualidade,
rapidez e economia
em relação
a um betão fabricado em estaleiro.

Consulte-nos.

Os nossos serviços técnicos
e comerciais
terão o maior prazer em prestar
todo o apoio
e colaboração
que nos forem solicitados.

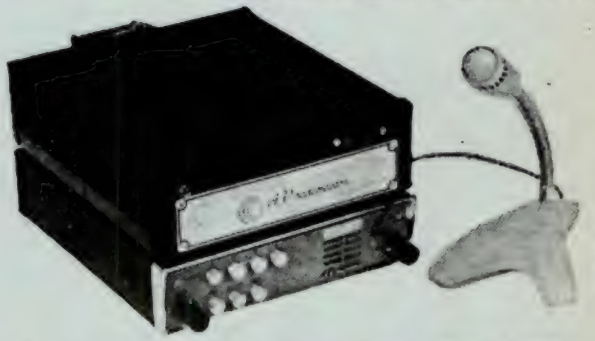
UMA NOVA MARCA DE BETÃO PRONTO

JOMATEL

EQUIPAMENTO DE TELECOMUNICAÇÕES

PORTÁTEIS - FIXOS - PARA VIATURAS

CITIZENS BAND
WALKIE TALKIES
V.H.F. / F.M.
CHAMADA SELECTIVA



VASTA GAMA DE ANTENAS E ACESSÓRIOS

EM EXPOSIÇÃO NO SALÃO DE VENDAS DOS REPRESENTANTES

MENDES DE ALMEIDA, S.A.R.L.

AVENIDA 24 DE JULHO, 52-C – LISBOA – TELEFS. 66 77 94/8

A difusibilidade térmica (*) é determinada em espécimes cilíndricos com diâmetro de 5 cm e altura de 10 cm. Os ensaios consistem em aplicar ciclos de arrefecimento e aquecimento ao espécime imerso em água e em registar as temperaturas em função do tempo, no centro do espécime e na sua face exterior. As temperaturas são medidas com pares termoeléctricos de cobre-constantan, com condutores de 0,18 mm e 0,20 mm de diâmetro. O par termoeléctrico central é colocado no espécime quando este é moldado. Os espécimes são devidamente impermeabilizados com borracha vulcanizável a frio, tal como o modelo. Cada espécime é submetido a cinco ciclos de aquecimento e arrefecimento e a difusibilidade térmica é calculada a partir dos registos das temperaturas interior e exterior em função do tempo, quando a diferença entre aquelas temperaturas é reduzida a metade do valor inicial (Condição A) e quando é de 4 °C (Condição B). Os resultados deste ensaio são obtidos com suficiente precisão para as aplicações práticas. No Quadro III figuram, para cada cilindro, os valores médios de cinco ensaios de aquecimento e arrefecimento, nas duas condições de ensaio, o valor médio por cilindro e o valor médio final adoptado para cada modelo ensaiado.

O método usado para a determinação do coeficiente de dilatação térmica (* *) fornece um valor médio suficientemente preciso para aplicações práticas. O ensaio é efectuado sobre espécimes prismáticos de 4 cm × 4 cm × 5 cm, obtidos a partir dos prismas moldados ao mesmo tempo que os modelos. As superfícies dos espécimes são preparadas da mesma maneira que as dos modelos. Numa das faces são colados, lado a lado, dois extensómetros eléctricos Baldwin SR4 tipo A7. Entre estes extensómetros são aplicados pares termoeléctricos. O espécime padrão é um prisma de quartzo fundido com um coeficiente de dilatação térmica igual a 0,54 × × 10^{-6}/°C. Neste prisma colam-se dois extensómetros eléctricos pertencentes ao mesmo lote dos colados nos espécimes de gesso. A fim de verificar a uniformidade da temperatura no interior do espécime de gesso, coloca-se um par termoeléctrico no centro de um cubo do mesmo material. Cada espécime é submetido a cinco ensaios de aquecimento e arrefecimento, entre cerca de 20 °C e 40 °C. No Quadro IV figuram os valores médios dos coeficientes de dilatação térmica, obtidos a partir dos cinco ensaios de cada espécime, relativos a cada um dos modelos ensaiados. No mesmo quadro figuram os valores médios finais adoptados nos cálculos relativos a cada um dos modelos.

(*) A técnica para a sua determinação está descrita em «Thermal Properties of Concrete», Bulletin 1, Part VII, United States Department of the Interior, Bureau of Reclamation.

(* *) Ver «Handbook for Concrete and Cement» Corps of Engineers, U. S. Army, Series CRD-C 125-52.

QUADRO IV

COEFICIENTE DE DILATAÇÃO TÉRMICA DO MATERIAL (MISTURA DE GESSO (G), DIATOMITE (D) E ÁGUA (A) NAS PROPORÇÕES: $\frac{A}{G} = 1{,}5$; $\frac{G}{D} = 3$)

Modelo	Prisma	Coeficiente de dilatação térmica (10^{-6}/°C)	
		Valores individuais	Valores médios
I	1	12,8	12,4
	2	13,2	
	3	12,6	
	4	12,8	
	5	11,5	
	6	11,7	
II	1	12,5	12,7
	2	12,4	
	3	12,9	
	4	14,5	
	5	11,9	
	6	11,9	

8 — DETERMINAÇÃO DAS TENSÕES PRINCIPAIS A PARTIR DOS ENSAIOS

Os valores das extensões ε''_{ik} são determinados, em cada ponto, a partir de diagramas idênticos aos da fig. 8, assim como as variações de temperatura nos mesmos pontos e nos mesmos intervalos de tempo considerados para a determinação de ε''_{ik}. Os valores de ε''_{ik} são corrigidos por meio da curva de calibração e, a partir dos valores corrigidos ε_{ik}, calculam-se as extensões principais que produzem tensões, em direcção e grandeza, por meio do círculo de Mohr das extensões.

A partir das extensões principais ε_I e ε_{II}, assim determinadas no modelo, calculam-se as tensões principais σ_I e σ_{II} no protótipo por meio das seguintes expressões:

$$\sigma_I = K_E \cdot K_\alpha \cdot K_\theta \cdot \frac{E_m}{1-\nu^2}(\varepsilon_I + \nu\varepsilon_{II}) \qquad (7)$$

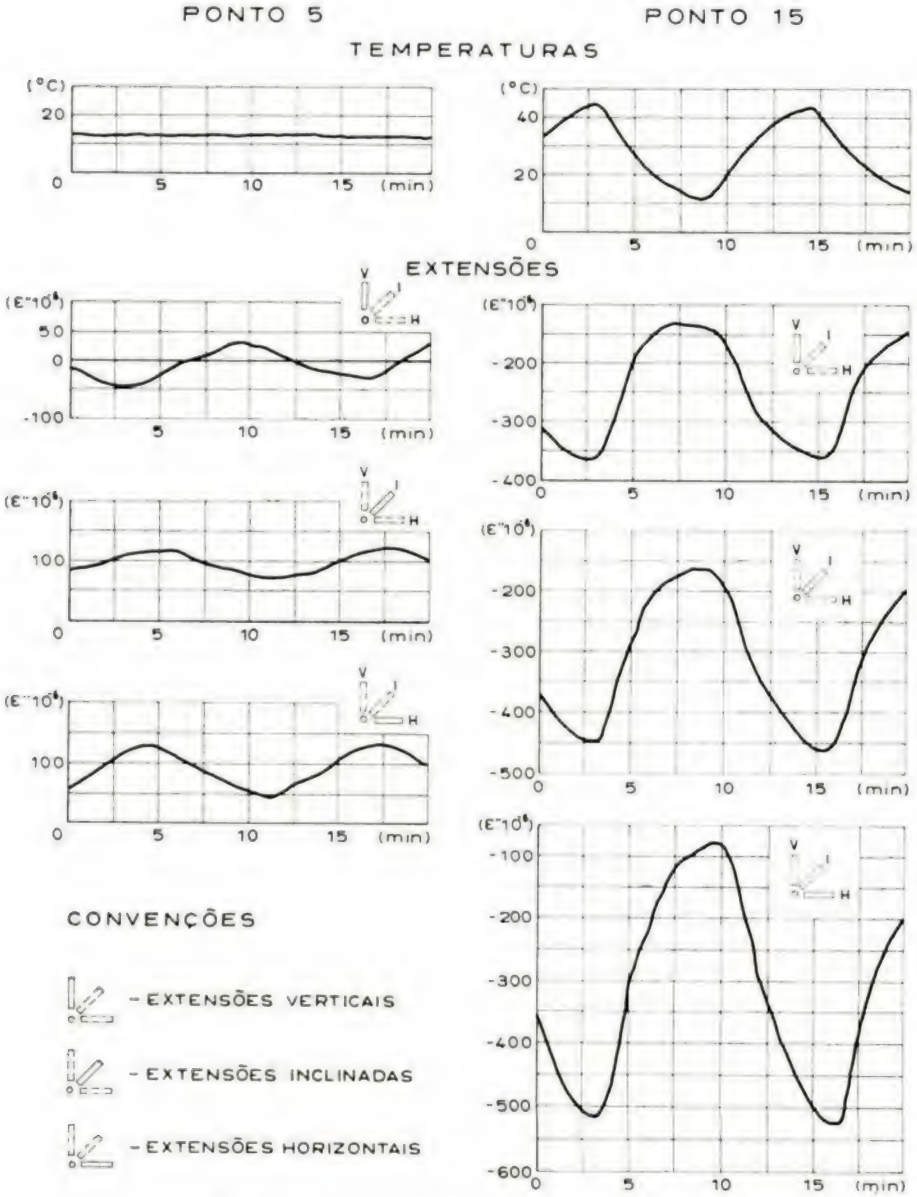


Fig. 8 — Temperaturas e extensões medidas

$$\sigma_{II} = K_E \cdot K_\alpha \cdot K_\theta \cdot \frac{E_m}{1-\nu^2}\left(\varepsilon_{II} + \nu\varepsilon_I\right) \qquad (8)$$

em que E_m é o módulo de elasticidade e ν o coeficiente de Poisson do material dos modelos.

9 – ALGUNS RESULTADOS

Na fig. 9, apresentam-se as tensões principais no protótipo de uma barragem correspondentes à descida de temperatura de um quarto de período. Este caso corresponde à

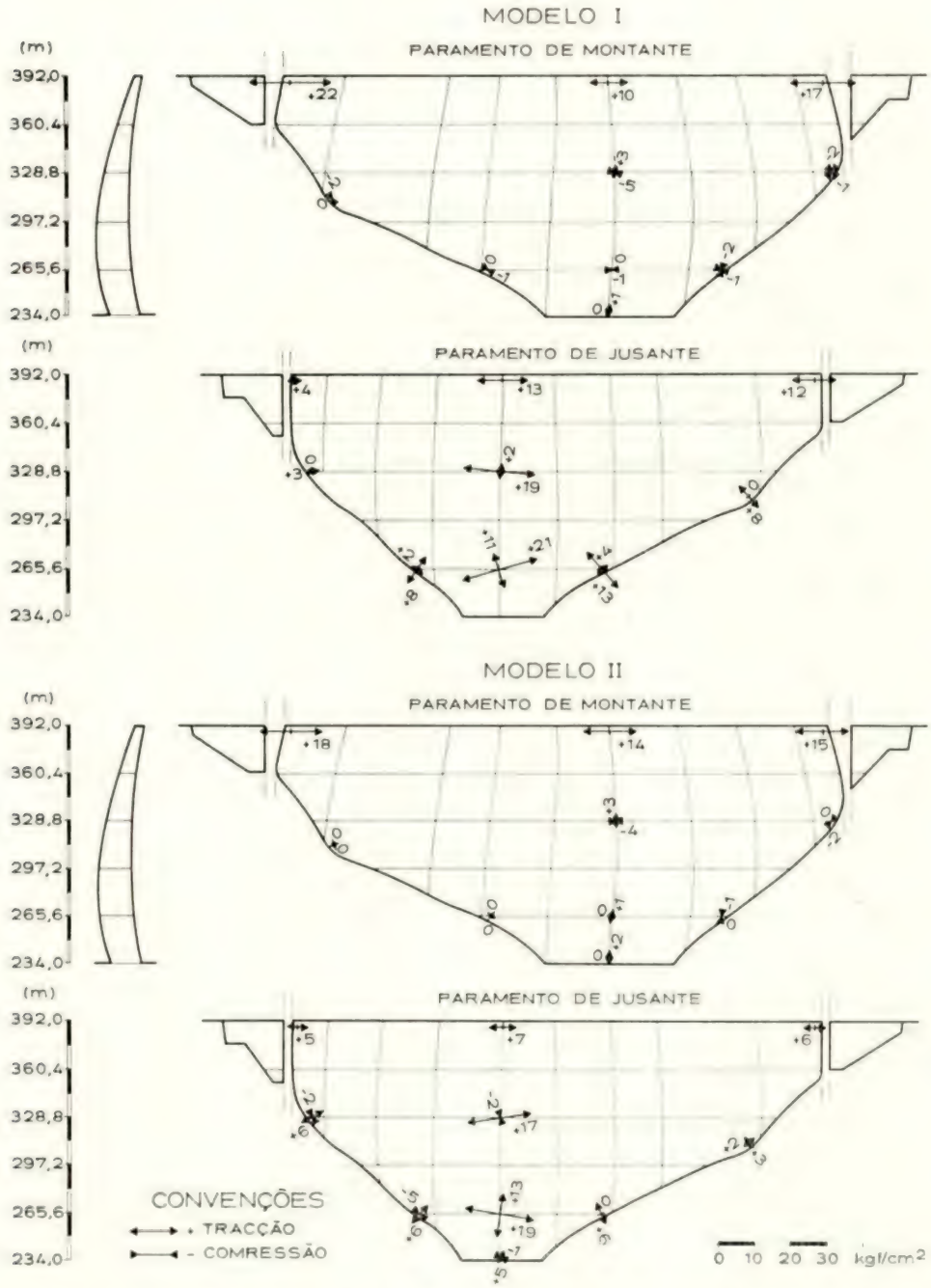


Fig. 9 – Tensões principais no protótipo devidas a uma descida de temperatura correspondente a 1/4 do período da onda anual

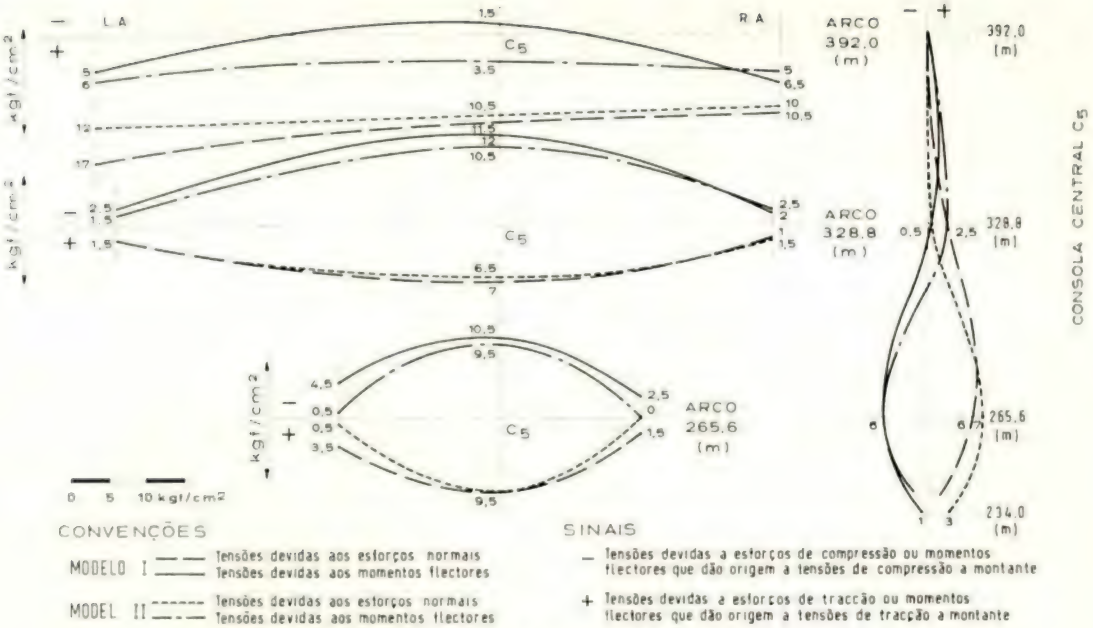


Fig. 10 — Tensões resultantes dos esforços normais e dos momentos flectores devidos a uma descida de temperatura correspondente a 1/4 do período do onda normal

hipótese de as juntas da barragem serem injectadas quando a temperatura dos paramentos é igual à média das ondas de temperatura nesses paramentos. Na fig. 10 apresentam-se as tensões nos arcos e na consola central devidas aos esforços normais e aos momentos flectores correspondentes aos valores das tensões que se apresentam na fig. 9.

10 — CONCLUSÕES

Os resultados dos ensaios até agora efectuados pelo LNEC mostram uma boa concordância entre os valores obtidos pelos dois modelos normalmente ensaiados, o que leva a ter confiança nas técnicas utilizadas. O equipamento descrito é extremamente versátil, permitindo a aplicação de vários tipos de solicitações térmicas, choques térmicos, variações periódicas e variações uniformes de temperatura. A grande complexidade do fenómeno térmico, difìcilmente abordável por métodos analíticos expeditos, e a facilidade e rapidez com que os ensaios descritos são executados aconselham a sua realização em todas as circunstâncias em que o projectista preveja que as tensões térmicas poderão vir a ser importantes.

AGRADECIMENTOS

Colaboraram no desenvolvimento das novas técnicas descritas neste trabalho e na realização das várias montagens e medições o Eng.º Artur Ribeiro dos Santos e os ajudantes de experimentador Domingos Rodrigues da Silva e Victor Rodrigues Fernandes Soares.

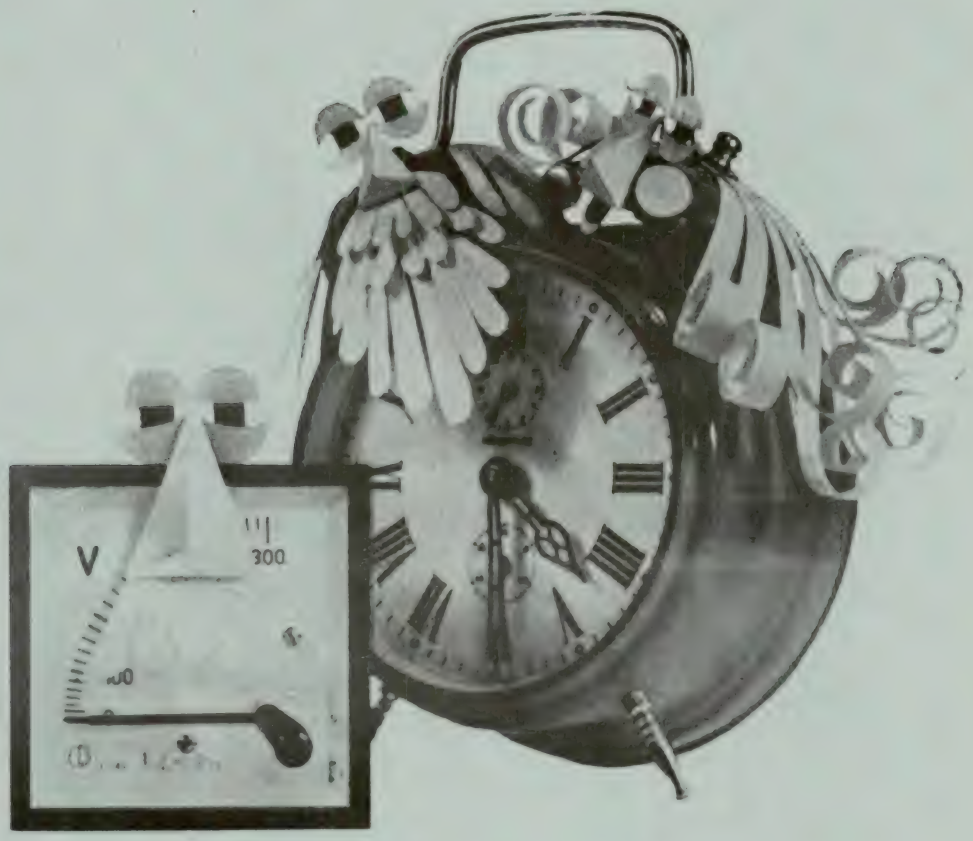
REFERÊNCIAS

[1] ROCHA, M.; J. L. SERAFIM — Determination of thermal stresses in arch dams by means of models. Comunicação apresentada ao 6.º Congresso das Grandes Barragens, Nova Iorque, 1968.

[2] ROCHA, M.; J. L. SERAFIM; A. COBEIRA — Determination of thermal stresses in arch dams by means of models. Boletim da RILEM, Nova Série n.º 10. Paris 1961.

[3] ROCHA, M.; A. F. DA SILVEIRA — The use of models to determine temperature stresses in concrete arch dams. Relatório n.º 23. Simpósio sobre Modelos de Barragens de Betão. LNEC. Lisboa 1963.

à medida do tempo criamos para si...o tempo das medidas eléctricas



FRAPIL impõe-se hoje como a técnica que satisfará as suas exigências, oferecendo-lhe uma gama completa de aparelhos de medidas eléctricas duma qualidade insuperável, duma simplicidade de emprego inegualada, severamente controlados em todas as etapes do seu fabrico, concebidos e executados para satisfazer a cada uma das suas necessidades.
Para si, que acompanha o progresso, criamos um aparelho contemporâneo do futuro

APARELHOS DE MEDIDAS ELÉCTRICAS **FRAPIL**

012.08.5813

FANAFEL

FÁBRICA NACIONAL DE FELTROS INDUSTRIAIS
SOCIEDADE LIMITADA

TELEF. 5 20 91/2/3 — OVAR - PORTUGAL — TELEG. FELTROS

FELTROS TECIDOS

TECIDOS FILTRANTES E INDUSTRIAIS

de fibras naturais ou sintéticas, puras ou em mistura
em qualquer formato e dimensão
para

Indústria papeleira
Pastas para papel
Fibrocimento
Curtumes
Industriais têxteis
Estamparia
Acabamentos
Lavandarias
Hospitais e Hotéis
Lonas em sintético

Correias transportadoras
Indústrias químicas
Filtração de água
Cervejas
Refrigerantes
Lacticínios
Azeite e produtos oleosos
Produtos gordurosos
Geleias

Vinhos
Açúcar
Farinhas alimentares
Sabões e detergentes
Cerâmicas
Captação e recuperação de poeiras
Despoeiragens
Tubos de ventilação
etc., etc., etc.

OS NOSSOS SERVIÇOS TÉCNICOS ESTÃO SEMPRE À VOSSA INTEIRA DISPOSIÇÃO PARA ESTUDAR QUALQUER PROBLEMA DE TECIDOS INDUSTRIAIS

Empresa Ultramarina de Sondagens e Fundações, L.da

(SONDADORA)

SONDAGENS geológicas e geotécnicas — CAPTAÇÕES de águas subterrâneas — REBAIXAMENTOS do nível freático — CONSOLIDAÇÕES E ESTABILIZAÇÃO do solo — INJECÇÕES DE CIMENTO e outros produtos — INFRAESTRUTURAS de barragens, túneis e pontes — FUNDAÇÕES de todos os tipos

Única Empresa da especialidade com sede no Ultramar Português

DELEGAÇÃO - LISBOA
Tr. do Guarda Mór, 13-r/c
Tel. 32 46 93 e 21 32 56

SEDE - LUANDA
R. Francisco Newton, 389/393
C.P. 2178 - Tel. 81 89 7

MOÇAMBIQUE
L. Marques - C.P. 982 - Tel. 74 11 21
Beira - C.P. 1002 - Tel. 7 14 97

C. D. U. 537.52:621.3.032.21

APLICAÇÕES DOS ARCOS DE CÁTODO ÔCO (*)

por A. ROCHA TRINDADE
Prof. Auxiliar do Instituto Superior Técnico
Bolseiro do Instituto de Alta Cultura

RESUMO

O Autor resume as principais características das descargas de arco, indicando os aspectos que são afectados quando se utiliza um cátodo ôco com injecção de gás pelo canal catódico. Mostra que é assim possível criar um plasma denso, altamente ionizado e pouco contaminado pelo metal do cátodo. Indica a evolução dos eléctrodos ôcos até à sua forma mais perfeita, os cátodos multicanais.

Aponta seguidamente quais as aplicações laboratoriais ou industriais que são particularmente beneficiadas por este tipo de descarga: máquinas de plasmas, lasers iónicos, conversores MPD, propulsores iónicos, fontes de electrões e reactores químicos de novo tipo.

SYNOPSIS

The first part of this work deals with the general characteristics of arc discharges, pointing out which ones are improved by using a gas-fed hollow cathode. We can obtain with this device a dense, highly ionised plasma, where contamination by metallic vapour is virtually absent. Multichannel hollow cathodes are present, showing how their performances are achieved.

The second part deals with those applications where hollow cathodes are specially interesting: plasma machines, Argon-ion lasers, MPD converters, ionic thrusters, electron sources and a new type of chemical reactors.

1. GENERALIDADES

Existe um grande número de experiências laboratoriais e de realizações de cariz mais acentuadamente utilitário, que exigem a criação e a manutenção de um plasma (gás ionizado).

Um dos processos mais simples de consegui-lo, consiste em provocar a passagem de uma corrente eléctrica entre dois eléctrodos, banhados pelo gás que se pretende ionizar.

Consoante a ordem de grandeza da corrente que circula entre os eléctrodos, distinguem-se vários tipos de descarga; na fig. 1, representa-se de uma forma semi-quantitativa um diagrama da tensão aos terminais da descarga (V) em função da corrente da descarga (I), evidenciando a existência de vários domínios característicos.

O domínio que particularmente nos interessa é o das descargas de arco, caracterizadas por uma corrente superior a alguns Ampères e com tensões aos terminais da descarga que são comparativamente baixas (inferior à centena de Volt no caso geral).

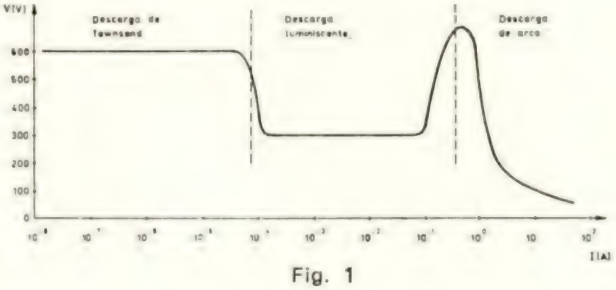


Fig. 1

Parece óbvio que uma tal corrente exige a presença de uma densidade volumétrica substancial de portadores de carga (electrões e iões positivos) cujo deslocamento, em direcção ao eléctrodo da polaridade contrária à de cada um deles, constitui afinal a corrente que se observa.

A existência de uma diferença de potencial baixa entre os eléctrodos, sugere que as

(*) Artigo recebido na redacção em 30/6/971

velocidades orientadas das partículas carregadas não devem ser muito elevadas, dado que o caso inverso implicaria a existência de forças eléctricas importantes (o que só seria compatível com a presença de um forte campo eléctrico longitudinal).

Estamos portanto em presença de um processo que se caracteriza pela alta eficiência da produção de partículas carregadas; quer estas provenham em maioria de um mecanismo de emissão dos próprios eléctrodos, quer resultem da ionização do gás neutro, o facto é que o plasma criado se caracteriza por uma forte densidade volúmica de electrões e de iões.

Outra faceta característica das descargas de arco é a existência de fenómenos térmicos importantes. A existência de grande número de partículas carregadas, capazes de adquirirem energia cinética a partir das forças eléctricas, torna muito frequentes as colisões entre estas partículas e os átomos neutros, com a consequente transferência de energia das primeiras para os segundos. Os átomos neutros adquirem assim, por via indirecta, uma energia de agitação térmica elevada, podendo atingir globalmente temperaturas de alguns milhares de graus. A condução térmica entre o gás quente e a matéria dos eléctrodos, por um lado, e os choques das partículas carregadas sobre as suas superfícies, têm tendência a aquecer o material de que são constituídas, conduzindo eventualmente à sua destruição por evaporação e por «sputtering» (desagregação superficial por bombardeamento).

São deste modo inevitáveis certas técnicas de protecção das paredes do recinto e dos próprios eléctrodos, contra os efeitos do aquecimento excessivo: circulação de fluidos refrigerantes nos suportes dos eléctrodos e na vizinhança das paredes, utilização de metais de alto ponto de fusão, técnicas de constrição do volume ionizado por meio de um campo magnético axial (*) etc.

Refira-se no entanto que o aquecimento do cátodo (abaixo de certo limite crítico conducente a deterioração), tem um aspecto fortemente positivo: a sua possível contribuição de electrões por emissão termoiónica (**).

2. DISTRIBUIÇÃO DE POTENCIAL NUM ARCO CLÁSSICO

Chamamos «arco clássico» a um sistema de descarga em que a corrente transita longitudinalmente entre dois eléctrodos planos, perpendicularmente colocados em relação ao eixo do recinto. (Fig. 2)

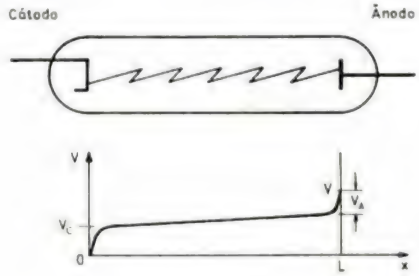


Fig. 2

Na mesma figura representámos a variação do potencial segundo o eixo da descarga tomando como referência o potencial do cátodo (0).

Verifica-se assim que se podem considerar, grosseiramente, três regiões distintas:

- Uma região na vizinhança imediata do cátodo (zona catódica), na qual existe um forte gradiente de potencial, correspondente a uma queda de tensão V_C (queda catódica).
- Uma região na vizinhança do ânodo (zona anódica) correspondendo a uma queda brusca de tensão V_A (queda anódica).

(*) Em presença de um campo magnético $\vec{B}$ uma partícula de massa m e carga eléctrica q descreve trajectórias circulares de pulsação $\omega_B = \frac{qB}{m}$ com um raio (raio de giração ou de Larmor) $r_B = \frac{w}{\omega_B}$ onde w representa a velocidade de agitação térmica da partícula. Um campo magnético axial tende assim a manter as partículas girando em torno do eixo do recinto, dificultando a sua aproximação das paredes.

(**) Seria literalmente mais correcto escrever «emissão termoelectrónica»; o termo «termoiónico» está no entanto consagrado para designar este fenómeno, embora sacrificando a coerência etimológica.

— Uma região intermédia, extensa, apresentando uma variação lenta de potencial (coluna positiva).

Suponhamos que existe na superfície do cátodo uma região de temperatura suficientemente elevada para que daí sejam libertos electrões por missão termoiónica. A queda catódica corresponde a uma tensão aceleradora capaz de fornecer aos electrões emitidos a energia cinética suficiente para a realização de colisões inelásticas sobre as partículas neutras presentes.

V_C é usualmente da ordem da dezena de Volt, sendo característica de cada conjunto metal do cátodo-gás da descarga (por exemplo, para o par tântalo-árgon, $V_C = 12$ V).

Possuindo os electrões emitidos uma energia cinética superior a 12 eV (no caso Ta—Ar) após ultrapassarem a zona catódica, e sendo esta energia suficiente para excitar os átomos de árgon que apareçam no seu percurso, caracteriza-se a zona seguinte (coluna positiva) por uma população importante de átomos excitados. Novos electrões rápidos provenientes da zona catódica produzirão novas colisões inelásticas, fornecendo aos átomos excitados uma energia que os faz ultrapassar o limiar de ionização ($V_i = 15{,}5$ V para o árgon). Criam-se assim pares electrão-ião que vão alimentar a corrente da descarga. Globalmente, estes processos podem ser descritos do modo seguinte:

$$e\ (\text{rápido}) + A \rightarrow A^* + e\ (\text{lento})$$

$$e\ (\text{rápido}) + A^* \rightarrow A^+ + 2e\ (\text{lento})$$

designando-se por A^* um estado excitado do átomo de gás.

Os electrões de emissão catódica e os electrões criados por ionização do gás dirigir-se-ão, arrastados pelo gradiente de potencial longitudinal, para o ânodo; os iões criados dirigem-se para a região catódica onde, acelerados pela queda catódica, vão bombardear o cátodo, aí libertando a sua energia. O aquecimento do cátodo resulta deste processo de bombardeamento iónico. (Fig. 3)

Encarando o fenómeno sob outro ponto de vista, poderá dizer-se que a queda catódica V_C resulta de um excesso de carga de espaço positiva na vizinhança do cátodo, enquanto que, simètricamente, V_A é consequência do excesso de carga de espaço negativa na vizinhança do ânodo (não sendo emissivo, este eléctrodo apenas recebe electrões, não havendo iões na sua proximidade).

Na coluna positiva (*) as densidades volúmicas electrónica e iónica equivalem-se, sendo aí o plasma macroscòpicamente neutro ($n_e \simeq n_i$); prova-se, nestas circunstâncias, que o campo eléctrico longitudinal X_E é aproximadamente constante para uma geometria uniforme do recinto (tubo de descarga de secção constante). [1]

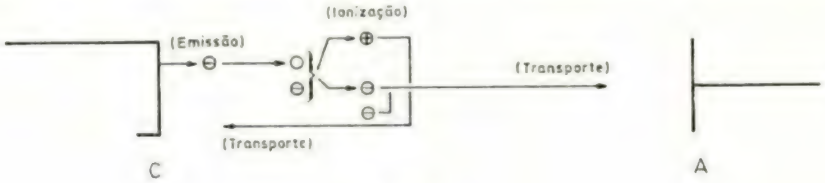


Fig. 3

3. ZONA ACTIVA DUM CÁTODO CLÁSSICO

Dado que a superfície frontal do cátodo apresenta ao iões que para este eléctrodo se dirigem, uma força eléctrica máxima (em relação aos pontos de superfície lateral) é sobre esta superfície que vai incidir a totalidade do bombardeamento iónico; por outro lado, todos os pontos desta superfície frontal são equiprováveis como sedes de emissão ter-

(*) A designação «positiva» é devida ao facto de o potencial do plasma nesta região estar mais próximo do potencial anódico que do potencial catódico.

moiónica ou como pontos de impacto do bombardeamento iónico. (fig. 4-A).

Dado porém que existem irregularidades nesta superfície, apresentando dimensões que, embora microscópicas, podem ser superiores à espessura da zona catódica (espessura da região de excesso de carga positiva), vão aparecer micro-campos extraordinàriamente intensos em certos pontos que deste modo se tornam singulares e portanto preferenciais para o trajecto da corrente de cargas. Nesses pontos haverá uma anormal concentração de bombardeamento iónico; logo um aquecimento superficial intenso, uma emissão termoiónica reforçada, um aumento local de conductividade (fig. 4-B). Ràpidamente se irá estabelecer um regime permanente em que toda a corrente se concentrará numa única região restrita do cátodo, cuja posição não é a priori previsível, dada a equiprobabilidade geométrica dos percursos (fig. 4-C).

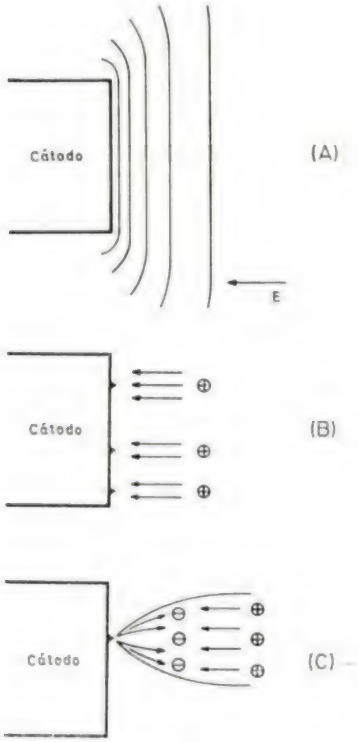


Fig. 4

Num cátodo sólido esta região fixa-se ràpidamente dada a deteriorização rápida por evaporação, criando uma irregularidade permanente em forma de cratera e visível a olho nu. Em cátodos líquidos (mercúrio) a zona activa do cátodo desloca-se na superfície livre duma maneira aleatória, dada a impossibilidade de uma deformação permanente da superfície.

Num cátodo metálico o chamado «ponto quente» ou «mancha catódica» apresenta muito fraca dimensão (toda a corrente passa por uma zona sub-milimétrica) ocasionando um fortíssimo aquecimento local que, se por um lado assegura um excelente rendimento de emissão, é igualmente responsável pela deterioração rápida do cátodo.

Este problema é resolvido de certo modo utilizando cátodos de ponta cónica, em cujo vértice se estabiliza o ponto quente; porém ao fim de alguns minutos (a forte corrente), a abertura de uma cratera repõe o problema nos termos anteriores.

Fig. 5

A deterioração da superfície do cátodo, além de afectar a longevidade do mesmo, tem como consequência lateral indesejável a poluição do plasma da coluna pelos átomos metálicos arrancados ou evaporados. A análise espectroscópica revela assim a presença de uma quantidade apreciável de vapor metálico; ao fim de um certo tempo (dependendo, evidentemente, da grandeza da corrente da descarga) observa-se um espelhamento da parede interna do vaso contentor, o que apresenta o inconveniente adicional de oferecer um percurso suplementar para a corrente do arco, curto-circuitando os eléctrodos entre si

4. ARCOS DE CÁTODO ÔCO

Estas descargas apresentam como característica geométrica particular a existência de uma cavidade no interior do metal catódico, aberta na direcção donde provém a corrente iónica (fig. 5). Na sua geometria mais simples o cátodo reveste a forma de um cilindro ôco, orientado segundo o eixo longitudinal da

é vasto o nosso campo de acção

6 DELEGAÇÕES NA METRÓPOLE E ULTRAMAR

CONSTRUÇÕES TÉCNICAS, LDA.

SIDERURGIA NACIONAL — Seixal — Vista aérea da Instalação de Laminagem (2.ª fase) — Grandes naves fabris (470 metros)

OBRAS PÚBLICAS
CONSTRUÇÃO CIVIL–INDUSTRIAL E URBANA

PROSPECÇÃO GEOTÉCNICA • FUNDAÇÕES ESPECIAIS • CONSOLIDAÇÕES
OBRAS MARÍTIMAS E PORTUÁRIAS • PONTES E VIADUTOS • SILOS E CHAMINÉS
INSTALAÇÕES INDUSTRIAIS

é vasto o nosso campo de acção

6 DELEGAÇÕES NA METRÓPOLE E ULTRAMAR

CONSTRUÇÕES TÉCNICAS, LDA.

MINISTÉRIO DO ULTRAMAR — Direcção-Geral de Obras Públicas e Comunicações — Ilha do Fogo (Cabo Verde) — Obras Portuárias de Vale de Cavaleiros: Molhe Acostável, doca e varadouro.

OBRAS PÚBLICAS
CONSTRUÇÃO CIVIL—INDUSTRIAL E URBANA

PROSPECÇÃO GEOTÉCNICA • FUNDAÇÕES ESPECIAIS • CONSOLIDAÇÕES
OBRAS MARÍTIMAS E PORTUÁRIAS • PONTES E VIADUTOS • SILOS E CHAMINÉS
INSTALAÇÕES INDUSTRIAIS

descarga. Por razões que a seguir se indicam, assegura-se um fluxo contínuo de gás através do canal cilíndrico em direcção ao recinto de descarga, o que implica uma evacuação do mesmo gás por meio de uma bomba.

Este tipo de descarga foi pela primeira vez utilizado por LUCE em 1958 [2]; em 1962 ROSE et al. [3] fizeram o primeiro estudo semi-quantitativo da descarga e das suas características. Este assunto foi exaustivamente estudado por DELCROIX, MINOO e TRINDADE [4 a 10] no Laboratoire de Physique des Plasmas da Universidade de Paris (Orsay), tendo dado origem a mais de duas dezenas de artigos em jornais científicos e comunicações a Congressos internacionais.

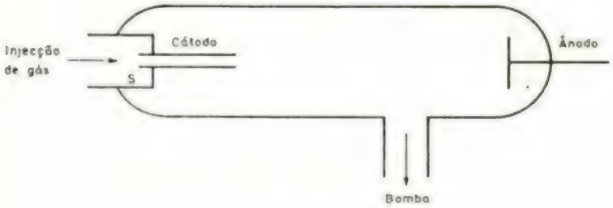
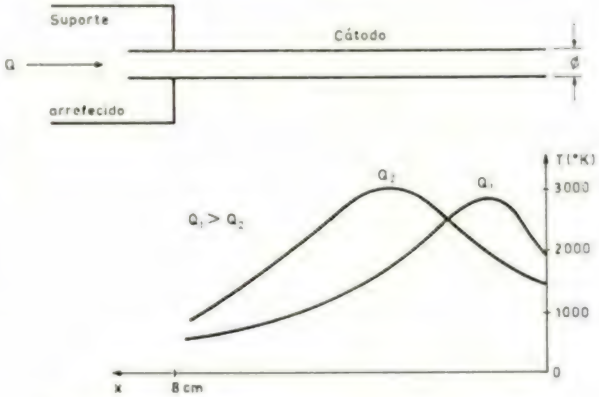


Fig. 6

A descarga caracteriza-se fenomenològicamente pela alta temperatura de toda a parede do cátodo (podendo atingir perto de 3000° K), pela ausência de «ponto quente» localizado e pelo valor importante que pode atingir a queda de tensão catódica V_c (até 50 V). Exteriormente o plasma criado caracteriza-se por um grau de ionização extremamente elevado (podendo a percentagem de partículas ionizadas atingir 90% do total), por uma ausência quase total de vestígios de átomos metálicos — o que implica igualmente uma duração do cátodo incomparàvelmente melhorada em relação aos cátodos clássicos.

O funcionamento normal do cátodo ôco caracteriza-se por uma distribuição regular da temperatura da parede, entre a ponta do cátodo e a extremidade oposta, em geral arrefecida por uma circulação da água no interior do suporte S (fig. 6) Esta parede é em geral fina por construção, de modo a impedir uma diferença de temperatura apreciável no sentido radial (espessura ≃ 0.2 mm).

A distribuição longitudinal da temperatura da parede catódica passa em geral por um máximo pouco acentuado; a posição deste máximo depende do débito de gás Q injectado pelo canal catódico (fig. 7).



Valores típicos para:

$\varnothing$ = 5 mm
I = 50 A
Q_1 = 1 cm^3 /s (TPN)
Q_2 = 0,2 cm^3 /s (TPN)
Gás : Árgon
Cátodo : Tântalo

Fig. 7

Várias teorias têm sido propostas para explicar, quer a fenomenologia desta descarga quer as suas características de eficiência e duração.

A mais satisfatória é devida ao presente Autor [11] e baseia-se no estudo do plasma que se forma no interior do canal catódico; embora bem fundamentada no domínio físico, apresenta deficiências no tratamento matemático, recorrendo a um modelo discreto («step-wise») no domínio da energia dos electrões, de modo a evitar a complexidade adicional do tratamento microscópico. Embora conduzindo a resultados coerentes com a evidência experimental, esta teoria deve ser melhorada, pelo que o problema ainda se não pode considerar estabilizado.

Resumindo as conclusões desse trabalho, poderá encarar-se o arco de cátodo ôco do modo seguinte:

A existência de uma cavidade (canal catódico) no trajecto dos iões provenientes do espaço interelectródico, prolonga o percurso dos iões, impedindo a sua concentração num ponto de impacto determinado; a corrente iónica no interior da cavidade pode decom-

pôr-se numa componente radial (que corresponde ao bombardeamento da parede) e numa componente longitudinal que corresponde a uma penetração no canal, devida à acção do campo eléctrico axial.

O bombardeamento da parede provoca o aquecimento desta, e portanto, emissão termoiónica. Os electrões emitidos adquirem, na baínha de cargas existente junto da parede, a energia suficiente para efectuar colisões inelásticas com os átomos neutros presentes, originando um plasma no interior do canal e tornando assim possível a penetração dos iões. O comprimento do plasma no interior da cavidade é função da pressão local do gás neutro (obedecendo esta às leis do escoamento), na medida em que a mobilidade iónica (e portanto a grandeza da componente longitudinal da corrente) é inversamente proporcional a esta pressão.

A repartição longitudinal da temperatura catódica resulta do cálculo de uma equação de transferência de calor: aquecimento da parede, por bombardeamento iónico, fotónico, impacto de átomos excitados, condução radial entre plasma e metal; arrefecimento, por radiamento, emissão termoiónica, evaporação, condução radial entre a parede e o gás frio; finalmente, condução térmica longitudinal do cátodo para o seu suporte arrefecido.

A alta eficiência da descarga como meio de criação de um plasma altamente ionizado resulta da existência de plasma no interior do canal metálico.

Na realidade esta situação implica a existência de uma baínha de carga do espaço e de um gradiente longitudinal de potencial (5 V/cm para um canal de 3 mm de diâmetro); os electrões emitidos adquirem energias capazes de ionizar directamente os átomos neutros sem necessidade da etapa intermediária de excitação de níveis metastáveis. A condição **sine qua non** para estes processos é uma relativa abundância de partículas neutras, conducente a um valor pequeno (alguns milímetros) do livre percurso médio de ionização; é esta a razão por que se torna necessário assegurar um fluxo de gás pelo canal catódico, de modo a assegurar em dada região deste uma pressão da ordem de alguns Torr.

O balanço de todos os processos conducentes a uma transição entre 3 níveis de energia interna diferente (estado fundamental, estado metastável, ião no estado fundamental), por motivo de colisões electrónicas com energias que variam segundo a abscissa do ponto de emissão — permitem calcular a eficiência dos processos de ionização, a população possível de electrões de várias energias e a densidade de átomos metastáveis na descarga.

Este último ponto, que foi pela primeira vez levantado no referido trabalho [11] de um modo inteiramente teórico, recebeu agora confirmação qualitativa (*) por via experimental [12]; prova-se assim que a descarga de cátodo ôco de árgon pode ser usada, em determinadas condições optimizadas para esse fim, como uma fonte de átomos metastáveis Ar^*.

5. UTILIZAÇÃO DOS ARCOS DE CÁTODO ÔCO

Podem resumir-se assim as características destes arcos:

- Criação de um plasma denso, fortemente ionizado e pràticamente isento de vapor metálico;
- Longevidade do cátodo;
- Grande densidade de corrente admissível: um cátodo de 3 mm de diâmetro interior debita fàcilmente 50 A em regime contínuo;
- Baixa resistência: $R_{cq} < 5\,\Omega$ para $I > 20$ A.

Podem igualmente apontar-se algumas limitações e inconvenientes:

- A criação de um plasma no interior do canal catódico exige uma injecção de gás pelo canal e uma bombagem do re-

(*) Os valores calculados e medidos não dão uma comparação totalmente satisfatória no que respeita à densidade dos metestáveis, provàvelmente porque o cálculo deste termo é muito sensível às aproximações feitas. No entanto, à guiza de consolação, salienta-se que a concentração efectivamente medida, (10^{11} cm^{-3} na coluna exterior), é muito superior à que se esperaria na ausência deste cálculo.

cinto principal, de modo a serem simultâneamente possíveis a penetração dos iões no canal e a ionização de neutros no mesmo. Estas duas condições (antagónicas) são possíveis se a pressão dos neutros no canal variar, segundo o eixo, entre alguns Torr e alguns décimos de Torr. Vemo-nos assim perante um trinómio: diâmetro interior do canal — — fluxo de gás injectado — pressão no recinto — que não pode ser modificado em total independência, para garantir um gradiente de pressão suficiente ao longo do canal.

Este tipo de descarga não pode funcionar neste regime se a pressão do recinto atingir cerca de 1 Torr; nem quando o débito de gás for insuficiente para um dado diâmetro de cátodo.

— Uma exigência superior de corrente da descarga pode implicar a utilização de diâmetros de cátodo mais importantes: na realidade, uma maior corrente exige um maior bombardeamento iónico e uma temperatura de cátodo suficiente para assegurar a emissão termoiónica necessária. A utilização de um cátodo maior fornece uma maior superfície emissiva sem que a temperatura atinja necessàriamente um valor que comprometa a integridade do cátodo. Inversamente, se a exigência de corrente é demasiadamente pequena, pode estabelecer-se o regime alternativo de arco com «hot spot», com os inconvenientes já apontados para os cátodos clássicos. A solução neste caso é utilizar um cátodo de diâmetro menor.

— O funcionamento mais eficiente destes arcos verifica-se para o cátodo em tântalo e o gás de árgon; se bem que outros gases raros (He, Kr, Ne, Xe) e o mercúrio, possam ser utilizados nestas descargas, o material de cátodo tem que ser um metal de ponto de fusão elevado (Mo, Ta, W), o que limita a latitude da escolha.

Em resumo, estes arcos são especialmente adequados à criação de plasmas densos, «limpos» e fortemente ionizados, e a todas as aplicações que exigem uma fonte de corrente intensa com uma tensão aplicada relativamente baixa.

6. CÁTODOS DE CANAIS MÚLTIPLOS

Atendendo às limitações apontadas no parágrafo anterior, o Laboratório de Física de Plasmas de Orsay desenvolveu e ensaiou um novo tipo de cátodo [13], [14], destinado a obviar a algumas daquelas dificuldades.

O princípio de concepção consistiu em dividir o fluxo de gás por grande número de canais paralelos; tendo sido provado que o máximo de temperatura da parede catódica se estabelece a uma abscissa onde a pressão do gás neutro é da ordem de 1 Torr [4], este artifício corresponde a criar as condições para que este ponto se situe mais próximo da boca de saída do cátodo, diminuindo por um lado a queda de tensão catódica (o que aumenta a eficiência da descarga) e permitindo por outro lado a diminuição do débito de gás necessário [14]. As figuras seguintes mostram a comparação entre um cátodo de canal simples e um cátodo de canais múltiplos («macaroni packet») do mesmo diâmetro exterior

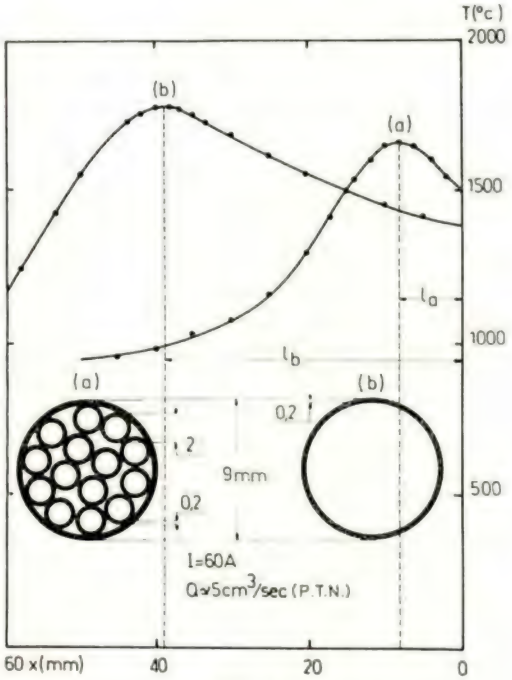


Fig. 8

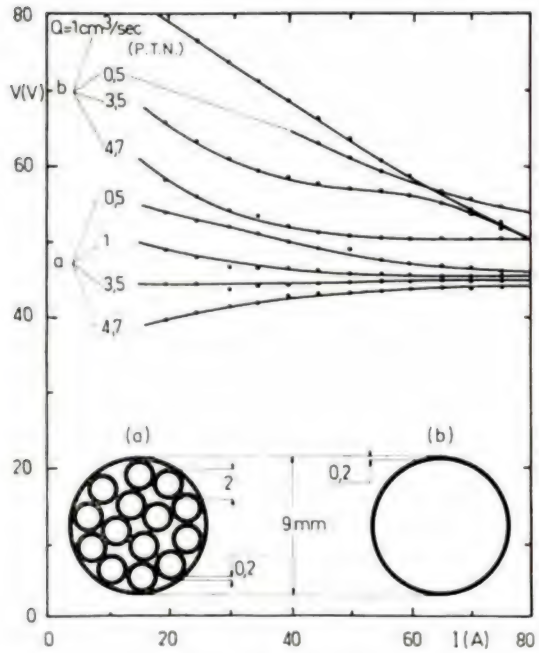


Fig. 9

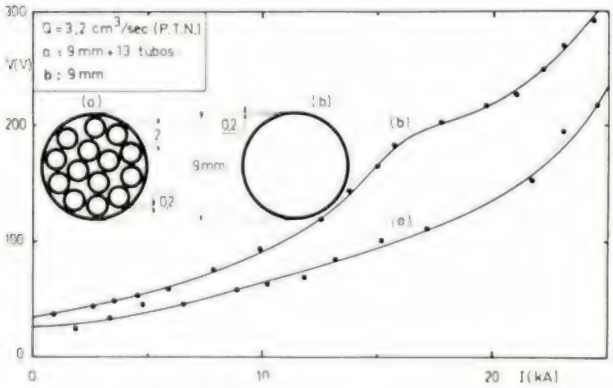


Fig. 10

e para o mesmo débito de gás (Fig. 8.: Temperatura catódica; Fig. 9: Tensão da descarge em regime contínuo; Fig. 10: Tensão da descarga em regime pulsado).

Esta maior eficiência da descarga resulta por um lado da maior superfície emissiva e, por outro lado, do aumento de bombardeamento das paredes internas pelo plasma que existe em canais adjacentes.

Além do mais, este tipo de cátodos ajusta-se automáticamente a pedidos variáveis de corrente, sem passagem ao regime destrutivo «hot spot»: a baixa corrente, apenas um (ou alguns) dos canais estará aceso; ao aumentar a corrente, mais e mais canais se tornarão activos, sem que variem sensìvelmente as condições existentes em cada canal. (Quadro 1)

Corrente	< 10 A	10 A	15 A	45 A	60 A
Percentagem de canais acesos	0	20%	30%	70%	100%

⌀ext = 8.6 mm
⌀canais = 3 mm

QUADRO 1

Este tipo de cátodo é portanto particularmente adequado ao funcionamento com pequeno débito de gás, e nos regimes em que a amplitude de variação de corrente da descarga seja elevada.

Na ref. [14] é apresentado um estudo sistemático dos aspectos teóricos e experimentais deste tipo de cátodo.

7. DESCRIÇÃO DAS PRINCIPAIS APLICAÇÕES DOS ARCOS DE CÁTODO ÔCO

Tendo em conta as limitações apontadas em 5 e 6, existe um vasto domínio de aplicação em que os arcos de cátodo ôco não sofrem do confronto com arcos de qualquer outro tipo. Por esta razão o seu emprego tem vindo a generalizar-se em todas as aplicações que exigem uma forte corrente de descarga com uma longevidade razoável dos eléctrodos. Apontaremos algumas destas aplicações.

7.1 — Máquinas de criação de plasma

Em vários tipos de experiências laboratoriais exige-se um meio ionizado, com características que são extremamente variáveis segundo o domínio do estudo.

O plasma pode ser criado por vários métodos: ionização puramente térmica de um gás neutro, síntese a partir de componentes elèctricamente carregados (feixe de iões, posteriormente «neutralizados» por emissão electrónica proveniente de fonte independente), ionização de contacto, processos multifotónicos associados à descarga de um laser de

HERÓIS DA LUBRIFICAÇÃO

Cotovelo Dobrado

O processo do «trado de rabeca» para fazer fogo foi descoberto pelos Índios Irritados da América do Norte.

O homem que soube tirar mais «lume» desta grande descoberta foi o Chefe de Abastecimentos da tribo, o relativamente pouco conhecido «Cotovelo Dobrado».

«Cotovelo Dobrado», que, nas horas vagas, era inventor, utilizou o método analítico para desenvolver e afinar a sua técnica do «trado de rabeca». A corda da rabeca era enrolada num trado de madeira e a rabeca andava para um lado e para outro, como se fosse uma serra, para, no ponto onde o trado era friccionado, inflamar um cavaco e fazer brasa. Até aqui o «música» ia bem.

Cotovelo Dobrado

Todavia, um elemento de incerteza muito importante se revelou neste processo.

O trado apoiava-se, no topo, num fino bloco de pinho que era mantido em posição pelo «fazedor» do fogo. Na maioria dos casos, o topo do trado aquecia depressa de mais. Então o fogo começava quase sempre por onde não devia começar.

«Cotovelo Dobrado» dobrou também o corpo sobre a prancheta de desenho em concentração profunda. A solução do problema, conforme «Cotovelo Dobrado» verificou depois de gastar muito «fósforo», residia na lubrificação do bloco de pinho — para evitar atrito no topo do trado e atritos com o chefe da tribo

Mas quem seria o «massa cinzenta» capaz de indicar um lubrificante adequado para esta nova e invulgar operação?

«Cotovelo Dobrado» quase descobriu novo processo de fazer lume ao passar velozmente o dedo pela lista dos seus fornecedores.

Os feiticeiros? Nem pensar nisso...

Os homens da MOBIL? Boa ideia!

«Cotovelo Dobrado» — que já há muito se abastecia na MOBIL de massa lubrificante, decidiu chamar um dos seus amigos engenheiros da MOBIL.

O engenheiro analisou o problema. A primeira coisa a corrigir era a folga no topo do trado: era preciso aumentá-la. Depois recomendou nogueira em vez de pinho para a feitura do bloco de apoio e aconselhou, também, a aplicação, em cada lua nova, de Gordura de Lontra Special Mobil (maravilhosa para topos de trados).

A epidemia de mãos queimadas terminou finalmente.

«Cotovelo Dobrado» já está há muito, junto dos seus antepassados, na «Grande Reserva de Caça nos Espaços». Mas a tradição iniciada por ele continua ainda.

Os clientes de hoje esperam bons lubrificantes dos seus fornecedores — sabendo, que uma assistência baseada em conhecimentos técnicos é tão importante como os próprios produtos. E eles sabem também que os engenheiros dos Serviços Técnicos da Mobil estão sempre preparados para apoiar os delegados, com a sua experiência técnica na solução dos mais diversos problemas de lubrificação.

Eles têm boas razões para preferirem a Mobil...

Muito mais assistência pelo mesmo «wampum» (*).

(*) **Wampum**: colares de conchas usadas originalmente pelos indios como moeda.

potência, descarga no seio de um gás. Neste último domínio, o arco de cátodo ôco permite criar colunas de plasma de densidade entre 10^{12} e 10^{14} electrões / cm^3, com temperaturas electrónicas entre a fracção de eV e alguns eV. Caso a bombagem do recinto seja suficientemente intensa, o plasma pode ser quase completamente ionizado.

Por este método foram criados plasmas com volume desde alguns cm^3 até à coluna gigante de Fontenay-Aux-Roses (França), de uma dezena de metros de comprimento e secção superior a 1 dm^2.

Neste tipo de máquinas de plasma o arco entre os dois eléctrodos é confinado por uma parede isolante, protegida em geral por um campo magnético longitudinal.

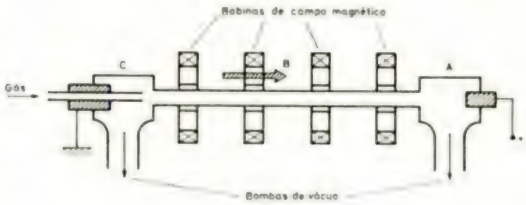


Fig. 11

O tipo de plasma criado é adequado ao estudo de certos tipos de propagação de ondas, sofrendo no entanto pelo facto de manifestar um nível de ruído que pode tornar-se indesejável.

Pode no entanto criar-se um plasma nitidamente menos ruidoso se não for necessária uma densidade electrónica tão elevada. Podemos neste caso criar um «plasma de difusão», em que as largas dimensões transversais do recipiente e a ausência do campo magnético longitudinal, permitem que o plasma difunda livremente, enchendo todo o volume disponível. Nestas condições provou-se ser possível obter um plasma com um nível de flutuações de densidade (ruído) inferior a 1% do valor médio — o que pode considerar-se um plasma calmo (quiescent plasma) [15].

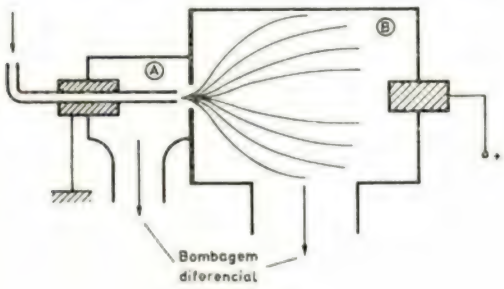


Fig. 12

O recipiente é em geral submetido a uma bombagem diferencial, sendo no recinto (B) a pressão significativamente inferior à que reina em (A) (o que exige a existência de um diafragma entre o recinto catódico e o recinto principal).

Uma modificação deste esquema consiste em introduzir do lado do ânodo um gás (b) de natureza diferente do gás de injecção catódica (a), sendo os gases escolhidos de tal modo que a reacção:

$$a^+ + b \rightarrow a + b^+ \qquad \text{(troca de carga)}$$

apresente um probabilidade elevada de ocorrência (potencial de ionização de b mais baixo que o de a). Esta reacção dar-se-á de preferência ao nível do diafragma, sendo no entanto as dimensões deste particularmente críticas. [16]

Este dispositivo é utilizado para transformar em plasma um gás com tendência para efectuar uma reacção química indesejável com o metal do cátodo.

7.2 — Lasers iónicos

Estes lasers são baseados na transição entre dois níveis excitados do ião dum gás raro, havendo sido assegurada a inversão de população entre esses dois níveis por uma correcta correlação entre as dimensões transversais da coluna, a pressão do gás introduzido nesta e a corrente da descarga [17].

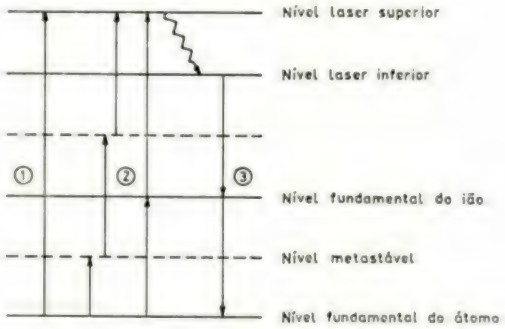


Fig. 13

Em resumo, o átomo de gás é excitado até ao nível superior, ou por meio de uma única colisão com um electrão de grande energia (caso 1, fig. 13), ou por meio de colisões de menor energia entre níveis intermediários (casos 2). Para assegurar a inversão de população entre os níveis superior e inferior, este último deve ser despovoado por um mecanismo suficientemente eficaz (caso 3): desexcitação até ao nível fundamental do ião, seguida de uma recombinação com forte probabilidade de ocorrência [18].

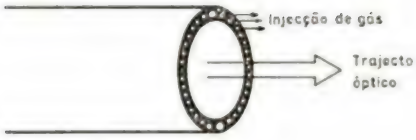


Fig. 14

Um laser utilizando um cátodo deste tipo já ultrapassou 1 Watt de potência óptica de saída [19].

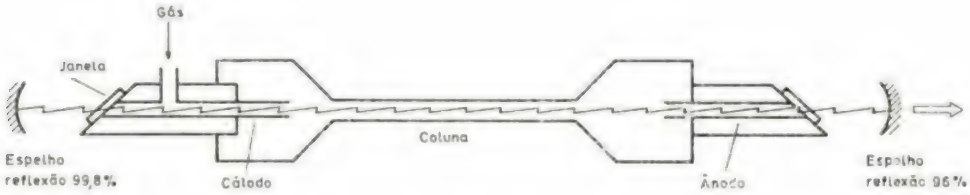


Fig. 15

A descarga de cátodo ôco funcionando com árgon é particularmente eficaz para esde tipo de laser: por um lado, a existência de uma forte população do nível metastável do Ar (energia 11,5 eV) facilita o processo de povoamento do nível superior; por outro lado, o valor elevado da queda catódica fornece electrões de energias suficientes para garantir estes processos de ionização e excitação. Dado que a potência óptica do laser cresce com o quadrado da corrente de descarga até valores da ordem de centena de Ampère, é altamente vantajoso utilizar cátodos que apresentem forte longevidade quando submetidos a correntes elevadas.

Finalmente, a própria geometria destes cátodos favorece a simplificação do dispositivo experimental, dado que o caminho óptico para a radiação está automàticamente assegurado pelo canal catódico.

A geometria adequada a correntes muito elevadas é mais complicada, consistindo numa coroa de tubos de pequena dimensão, contidos entre dois tubos de diâmetros diferentes; o gás é injectado pelo interior da coroa, sendo o trajecto óptico assegurado pelo interior do tubo de menor diâmetro.

Assinale-se que a potência obtida está neste momento (1971) limitada pelo comportamento térmico da coluna e já não pela duração da vida do cátodo, devido à utilização dos cátodos ôcos de canais múltiplos.

7.3 — Conversão MPD

A conversão de energia por meio de um sistema magnetoplasmadinâmico (MPD) (*) é baseada na existência da força de Lorentz resultante da interacção entre um campo magnético e uma corrente normal à sua orientação.

Consideramos um sistema MPD em regime permanente:

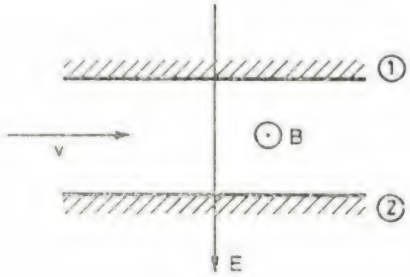


Fig. 16

(*) A tendência actual é a de utilizar este termo em vez da palavra «magnetohidrodinâmico» (MHD) cujo significado é ligeiramente impróprio.

No interior de uma conduta circula um gás com velocidade $\vec{v}$, estando aplicado um campo magnético B transversal.

Caso esse gás se transforme num plasma, o deslocamento de partículas ionizadas à velocidade v e a sua interação com $\vec{B}$ dão origem a um campo eléctrico induzido $\vec{E} = \vec{v} \times \vec{B}$. Se um circuito exterior estiver fechado por uma carga entre as placas (eléctrodos) 1 e 2, aparece uma corrente de densidade $\vec{j}$ e uma força $\vec{j} \times \vec{B}$ tendente a travar o movimento de partículas.

O sistema funciona assim como gerador. No caso inverso (funcionamento como motor) é um campo aplicado $\vec{E}$ que se impõe entre os eléctrodos, observando-se como consequência o aparecimento de uma força aceleradora do plasma.

A análise da expressão:

$$\vec{F} = q\vec{E} + \vec{\sigma}\left[(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \times \vec{B}\right]$$

sendo q a carga da partícula, $\vec{F}$ a força actuante e $\vec{\sigma}$ o tensor condutividade do plasma, mostra que existem forças longitudinais (no interior do parêntesis recto) e uma força transversal $q\vec{E}$ que perturba o escoamento do fluido. Deve esta força ser mantida num valor inferior ao da força longitudinal, para o que é necessário assegurar grande velocidade do fluido, campos magnéticos extremamente elevados (recorrendo às técnicas da supercondutividade para manter as perdas dentro de limites aceitáveis); finalmente, é indispensável assegurar a ionização do gás à entrada do sistema e um elevado valor da condutividade σ.

Ambos os objectivos se conseguem introduzindo no meio do gás sobre-aquecido (200 a 300° K) uma «semente» alcalina (césio ou potássio). Prova-se que nestas condições se obtém uma ionização térmica, com tanto maior conductividade quanto aumente a temperatura e a percentagem de inseminação alcalina.

São estes na realidade os grandes espinhos dos conversores (MPD): necessidade de semente e temperaturas perigosamente elevadas.

Ambas as exigências conduzem à deterioração rápida dos eléctrodos, e a duração da vida dos sistemas experimentais construídos era ainda há pouco da ordem dos minutos.

Os eléctrodos ôcos parecem poder trazer uma resposta a este problema. Na realidade, se considerarmos placas construídas de materiais cerâmicos refractários (alumina, zircónio, óxido de berílio) onde desembocam eléctrodos ôcos de tântalo de diâmetro suficientemente pequeno e número suficientemente grande, teremos parcialmente resolvido o problema da corrosão dos eléctrodos.

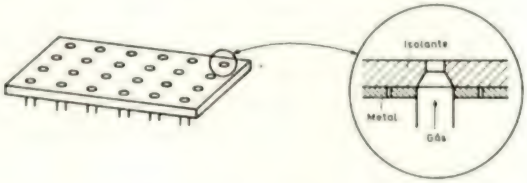


Fig. 17

Será evidentemente necessário assegurar um fluxo de gás pelo interior dos cátodos, de modo a assegurar a protecção destes. Aliás, esta corrente gasosa tem a vantagem suplementar de «romper» uma camada limite que eventualmente tenha tendência a formar-se no interior da câmara, devido à estagnação do fluxo de gás jutno das paredes.

Acrescente-se que esta concepção parece indicar como mais favorável o sistema em circuito fechado (*), em que o fluído é recirculado incessantemente entre a entrada e a saída da câmara.

Enunciado desta maneira, o problema parece relativamente fácil. No entanto, algumas dificuldades foram escamoteadas, nomeadamente:

— Prova-se que a pressão de trabalho, por considerações de rendimento energético, deve

(*) O conversor em circuito aberto utiliza directamente os gases de combustão à saída de uma turbina, e não se põe, evidentemente, o problema da sua recuperação.

ser da ordem de 1 Atm. Ora verifica-se que o regime normal dos cátodos ôcos é incompatível com pressões desta ordem de grandeza. Pode resolver-se o problema assegurando uma ligação térmica eficiente entre a parede do recinto e o metal catódico, de modo a fornecer ao cátodo o aquecimento suplementar que lhe é necessário para o funcionamento em alta pressão [20].

— À pressão de 1 Atm. a temperatura electrónica é muito próxima da temperatura do gás neutro. Ora a temperatura deste está limitada pelo comportamento térmico das paredes do recinto (no máximo 3000° K). Para conseguir uma conductividade aceitável com temperatura electrónica tão baixa, é provàvelmente necessário assegurar uma pré-ionização do gás.

— Para um conversor tipo circuito fechado, o gerador deve estar inserido entre um reactor nuclear e a turbina; esta fornece fundamentalmente a energia necessária ao fluxo de gás na câmara MPD.

7.4 — Propulsores iónicos

Este tipo de propulsores destina-se principalmente à orientação ou a pequenas correcções de órbita de satélites artifíciais ou naves espaciais habitadas.

Num sistema deste tipo, a propulsão implica necessàriamente dispêndio de massa; dada ainda a limitação inevitável da massa que pode ser sacrificada, interessa obter o maior impulso possível com o menor número de átomos perdidos pelo satélite.

Em consequência, para todo o tipo de missões espaciais de longa duração, é inconveniente utilizar a propulsão química, cujo dispêndio de massa é demasiadamente elevado. A propulsão iónica parece naturalmente indicada, sendo necessário evidentemente produzir (e perder) estes iões; mas agora a energia para aceleração das partículas é de origem exterior — radiação captada por células solares — não implicando dispêndio de massa.

O problema do propulsor iónico resume-se assim a: produção de iões; aceleração de iões; neutralização da carga de espaço.

Na realidade, dado um plasma constituído por electrões e iões, é fácil ver que não se pode efectuar uma separação de cargas (separar os iões positivos dos electrões) para além de um dado limite; se assim fizéssemos, as forças eléctricas induzidas opor-se-iam a esta separação, de modo a restaurar a neutralidade global do plasma.

É necessário portanto produzir iões, acelerá-los em dada direcção por meio de um campo eléctrico e fornecer-lhes então os electrões necessários para o anulamento da carga espacial. Pràticamente o problema resolve-se interpondo no percurso dos iões acelerados uma grelha metálica aquecida a temperatura suficiente para fornecer a corrente de emissão termoiónica necessária.

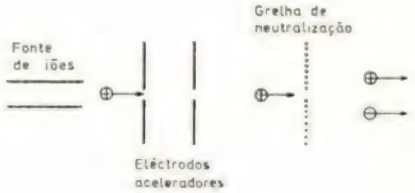


Fig. 18

Para o caso que nos interessa apenas é relevante a descrição da fonte iónica.

Aproveitanto as propriedades do arco do cátodo ôco, parece possível construir uma fonte iónica com fluxo invertido, isto é: no recinto principal reina uma pressão da ordem de 1 Torr, considerando-se que no exterior a pressão é sensìvelmente mais baixa. Um estrangulamento na extremidade do cátodo e a injecção do gás na câmara, asseguram o gradiente de pressão necessário.

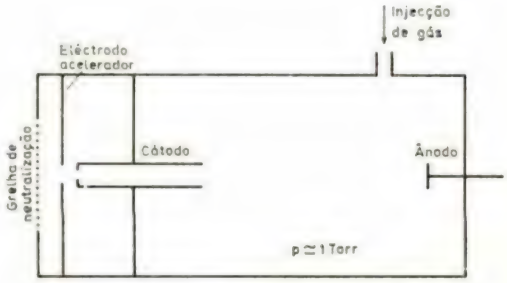


Fig. 19

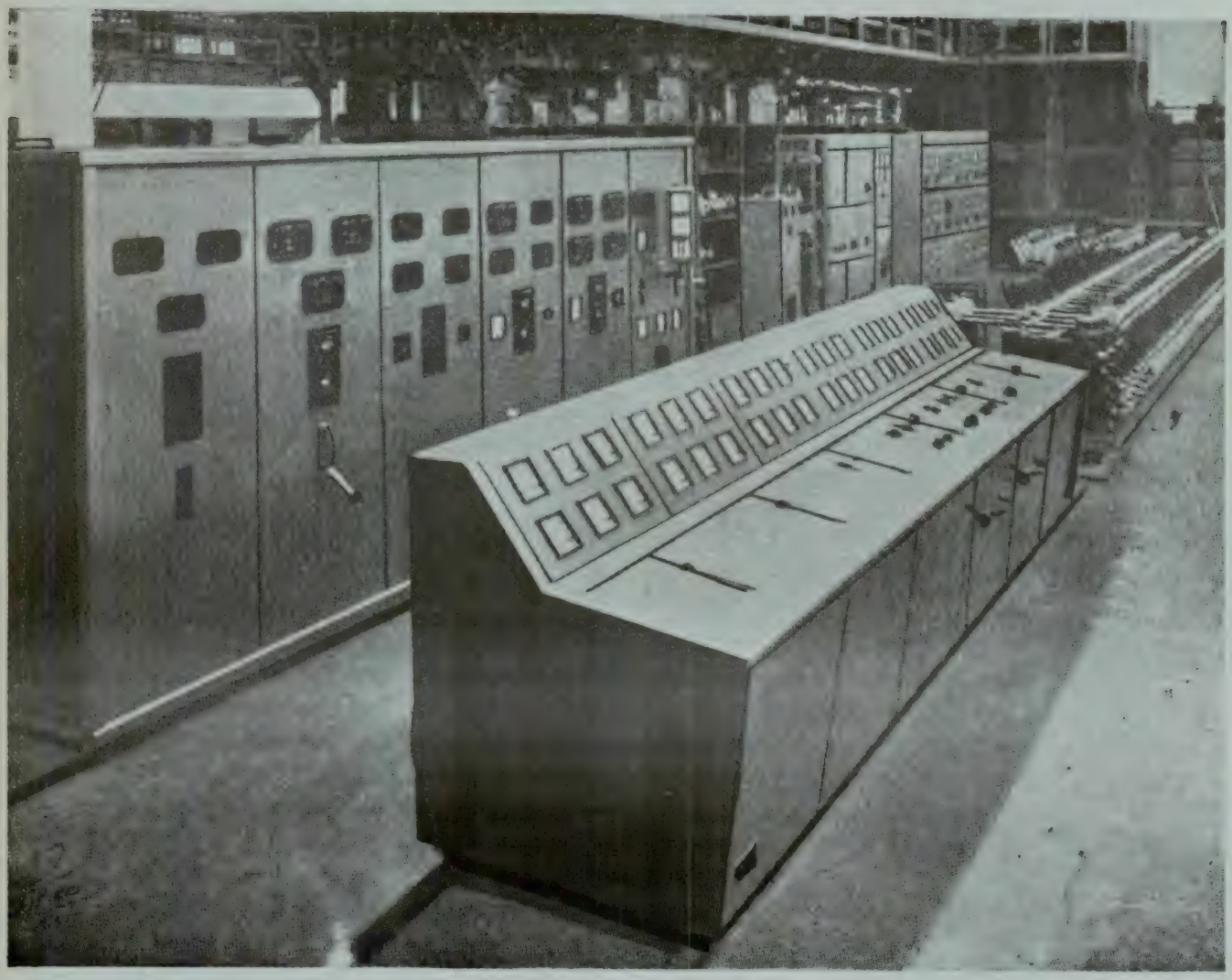
JAYME DA COSTA, L^DA

MECÂNICA E ELECTRICIDADE EM TODAS AS APLICAÇÕES

PORTO
Praça da Batalha, 12
Telef. 2 28 12 (PPC)

LISBOA
Rua dos Correeiros, 14
Telef. 32 70 35 (PPC)

LUANDA
Cx. Postal 5174
Telef. 4743

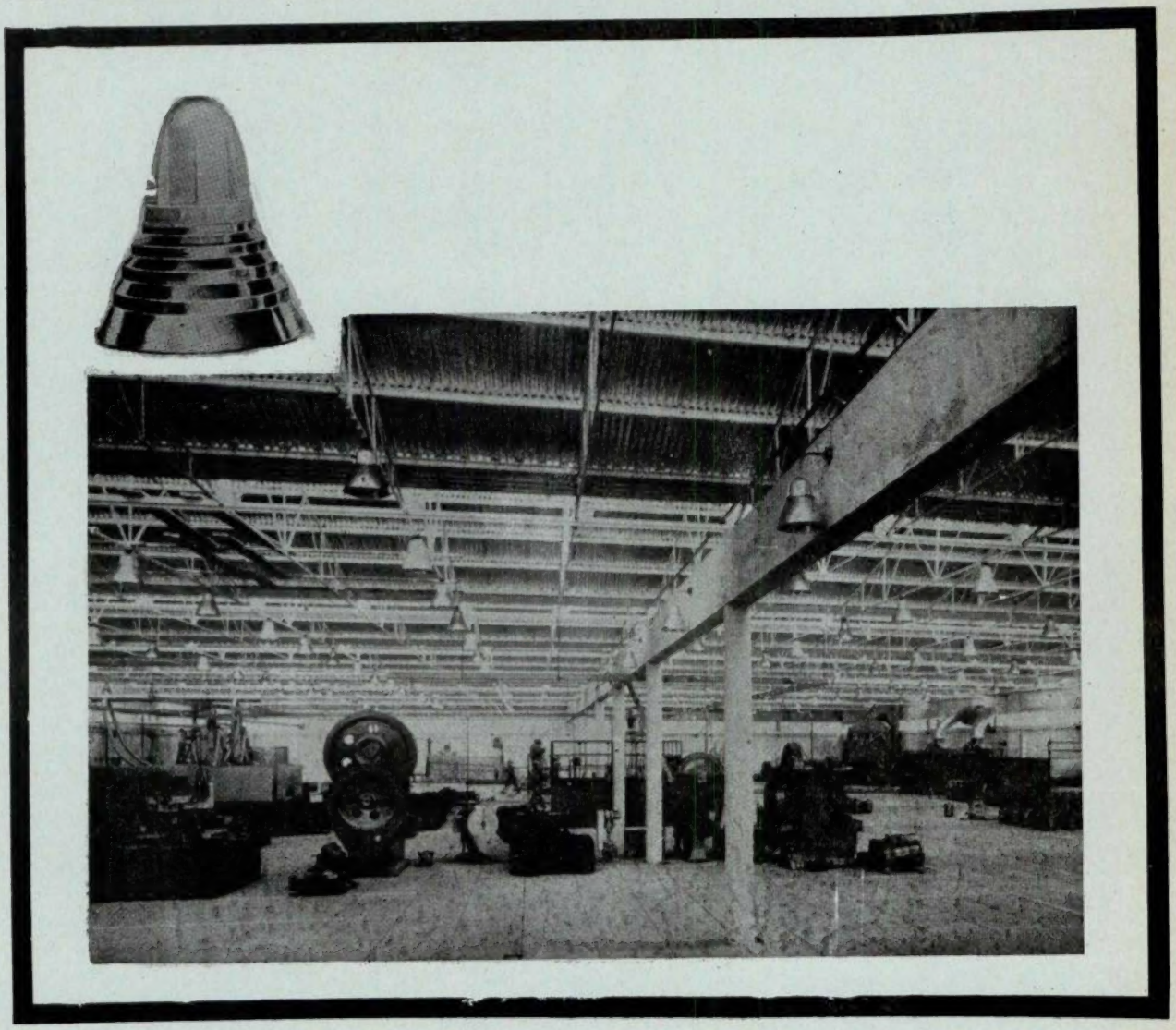


Material fabricado nas nossas oficinas, pronto para expedição

- Fabricação de aparelhagem eléctrica de alta e baixa tensão
- Equipamentos electromecânicos completos para centrais e fábricas
- Postos de transformação tipo monobloco
- Quadros blindados, capsulados e em armário
- Armaduras de iluminação de todos os tipos
- Contadores eléctricos e instrumentos de medida
- Telemedida e telecomando
- Instalações elevatórias de água
- Instalações de saneamento e esgotos
- Ferramentas de corte
- Motores Diesel industriais e marítimos
- Fogões eléctricos
- Frigoríficos
- Ventilação e condicionamento de ar
- Aparelhagem de Raios X e electromedicina

ARMADURA DE ILUMINAÇÃO

TIPO **PC**



1. Aparelho especialmente concebido para iluminação de recintos fabris e desportivos; uma vasta gama de reflectores permite escolher a melhor solução, caso por caso, para melhores resultados fotométricos.

2. Na foto: Petróleo Mecânica ALFA, Guimarães.

CONSTRUÇÕES ELÉCTRICAS SCHRÉDER, LDA.

P. JOSÉ FONTANA, 25 - LISBOA-1 - TEL. 561001

Do mesmo modo se podem construir fontes de electrões, tendo uma disposição simétrica dos eléctrodos em relação à fonte de iões acima descrita: o eléctrodo acelerador encontra-se do lado do ânodo, sendo este perfurado para permitir a passagem do feixe.

O uso de cátodos ôcos neste tipo de fonte mostra que se obtêm correntes electrónicas mais intensas com menor deterioração dos eléctrodos [21], em comparação com as fontes Von Ardenne [22] que usam um cátodo de forma clássica.

7.5 — Maçaricos de plasma

Um maçarico de plasma é um tubo de descarga, funcionando em geral em ambiente atmosférico, capaz de produzir localmente temperaturas muitos elevadas numa massa de gás que flui entre dois eléctrodos. (Fig. 20)

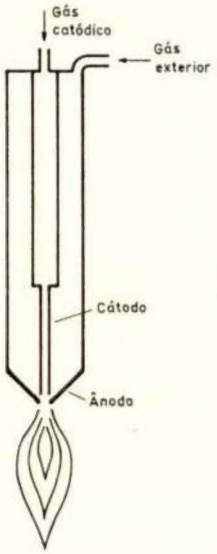


Fig. 20

Num maçarico de plasma com cátodo de formato clássico existe apenas uma injecção de gás exterior, que expulsa do espaço interelectródico o arco que se forma entre cátodo e ânodo. A chama de plasma assim obtida pode atingir temperaturas até 10.000° K, consoante a corrente do arco.

Como já assinalámos anteriormente, a formação de um ponto quente na extremidade do cátodo deteriora-o ràpidamente, com o inconveniente suplementar de o metal evaporado ser deposto na superfície onde a chama vai incidir. A utilização de cátodos ôcos obvia a este inconveniente; a injecção de gás interior destina-se mais a proteger o próprio cátodo do que a garantir boas condições de pressão no canal catódico.

A injecção de árgon ou outro gás raro permite criar uma atmosfera protectora em torno da área banhada pela chama, o que é por exemplo conveniente para soldadura de materiais oxidáveis.

Estes maçaricos são igualmente adequados para pulverização de superfícies em camada fina, bastando introduzir o material a depositar, sob forma pulverulenta, pela entrada do gás exterior.

Finalmente, podemos indicar todas as aplicações que exigem grandes concentrações de energia em áreas relativamente extensas, sem contacto material com essas áreas.

7.6 — Reactores químicos

A presença de uma população importante de átomos metastáveis na descarga de árgon de cátodo ôco permite encarar com optimismo um ramo especial da química de plasmas.

Se se considerar que um átomo metastável de árgon possui uma energia interna de 11,5 eV e que a secção eficaz de desexcitação por colisão com outra partícula pesada, é relativamente elevada (superior a 10^{-16} cm^2), verificamos que se dispõe de um utensílio extremamente poderoso para a efectivação de reacções químicas endoenergéticas. Assim, toda a reacção química cuja energia de reacção seja inferior áquele valor é a priori possível.

Quer sob a forma de reacção a dois corpos (como a ionização de Penning):

$$A^* + B \rightarrow A + B^+$$

quer sob a forma de recção a três corpos, em que a desexcitação de A^* fornece a energia necessária para a reacção $B+C=BC$, uma tal fonte de átomos metastáveis parece poder vir a abrir um novo domínio de aplicações químicas.

NOTA:

Após a redacção deste artigo realizou-se em Orsay (França) a 1.ª Conferência Internacional sobre Descargas de Cátodo Ôco e Aplicações. Esta conferência reuniu cerca de 70 especialistas neste domínio e teve o mérito de confirmar o interesse e as vantagens deste tipo de descargas. Por ser um assunto de evolução muito rápida e de modo algum estabilizado, foi deliberado efectivar no futuro a realização desta Conferência. Assim, foi constituída uma Comissão Internacional da Conferência com 6 delegações permanentes: Alemanha, Estados Unidos, França, Portugal, Roménia e União Soviética prevendo-se, a realização das duas próximas Conferências respectivamente em Bucarest (1973) e Lisboa (1975).

BIBLIOGRAFIA

1 – TRINDADE, A. R. – 1.º Curso Livre sobre Física de Plasmas – Cap. 7. CENN/ /GP. RI n.º 8 – Lisboa (1971).

2 – LUCE J. S. – Proc. 2nd U. N. Conf. of P. U. A. E. 31 (1958).

3 – ROSE, D. J.; LIDSKY, L. M.; ROTHLEDER, S. D.; J. Appl. Phys. 33 n.º 8 (1962).

4 – TRINDADE, A. R. – Thèse 3ème Cycle, Paris (1968).

5 – DELCROIX, J. L; MINOO, H; TRINDADE, A. R. – J. Phys. 29 – 605 (1968).

6 – DELCROIX, J.L; MINOO, H; TRINDADE, A. R. – C. R. Acad. Sci. Paris, 266 B – 76 (1968).

7 – DELCROIX, J. L; MINOO, H; TRINDADE, A. R. – Rev. Roumaine Phys. 13 – 401 (1968).

8 – DELCROIX, J. L; MINOO, H; TRINDADE, A. R. – IXth ICPIG – Bucarest (1969).

9 – DELCROIX, J. L; MINOO, H; TRINDADE, A. R. – VIIIth ICPIG – Vienna (1967).

10 – MINOO, H. – Xth ICPIG – Oxford (1971).

11 – TRINDADE, A. R. – Étude des méchanismes de fonctionnement d'un arc à cathode creuse – PORT. PHYS. 6 – 1/2 (1970).

12 – RICCARD, J. – Mesure de la densité des métastables dans un arc à cathode creuse (comunicação privada, 1971).

13 – DELCROIX, J. L.; MINOO, H; TRINDADE, A. R. / Brevet France n.º 119566 CNRS – Paris (1967).

14 – DELCROIX, J. L.; MINOO, H; TRINDADE, A. R. – Rev. Sci. Inst. 40 – 12 (1969).

15 – MINOO, H. – Thèse d'État – Orsay (1969).

16 – ROSE, D. J.; GERRY, E. T. – J. Appl. Phys. 37-7 (1966).

17 – JOLLY, – Thèse 3ème Cycle – Orsay (1970).

18 – TRINDADE, A. R. – Memórias da Ac. Ciências Lisboa n.º XIV (1970).

19 – DELCROIX, J. L.; MINOO, H; TRINDADE, A. R.; ZSILI, Z. – C. R. Acad. Sci. Paris, n.º 270 (1970).

20 – DELCROIX, J. L.; MINOO, H; POPOVICI, C. – Fonctionnement d'une décharge à haute pression (comunicação privada, 1971).

21 – DUGDALE, R. A; FORD, S. D; MASKREY, J. I.; THACKERY, T. A. – 1st Conf. on HCD and Applications (1971).

22 – VON ARDENNE, M. – Exptl. Tech. Physik. q 227 (1961).

C. D. U. 624.131.43

EFEITO DO TEMPO NAS CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DO SOLO (*)

por FERNANDO GUEDES DE MELO
Engenheiro Civil
Especialista em Geotecnia, LNEC

RESUMO

No presente trabalho faz-se o estudo da evolução das características mecânicas dum solo quando submetido à actuação prolongada duma tensão predominante hidrostática.

Estudos experimentais efectuados com um dado solo mostraram que, naquelas condições e não obstante o índice de vazios se ter mantido pràticamente constante, se produziram alterações sensíveis no seu comportamento.

As alterações observadas são particularmente sensíveis para a zona das pequenas deformações, atenuando-se ràpidamente à medida que a rotura se aproxima.

A explicação do fenómeno é atribuída a modificações estruturais relacionadas com reorientações das partículas do solo.

SYNOPSIS

The present paper studies the evolution of the mechanical characteristics of a soil under a lon-term predominantly hydrostatic stress.

Experimental studies on specimens of a given soil subjected to this load, showed appreciable changes in the behaviour of the specimens although the void ratio remained practically constant.

The changes observed are particulary marked in the zone of small deformations and decrease very fast as rupture approaches.

This fact is ascribed to structural changes connected with the reorientation of soil particles.

1 – INTRODUÇÃO

Um solo submetido a um estado de tensão com componente hidrostática sofre consolidação, isto é, evolui no sentido dum estado de equilíbrio final com passagem por sucessivos e contínuos estados intermédios caracterizados por distâncias médias entre partículas cada vez menores.

A velocidade a que se processa a variação dessa grandeza é função das características reológicas do solo em questão, com especial relevo para a deformabilidade do seu esqueleto sólido e para a viscosidade do fluído intersticial.

Como as propriedades mecânicas dum solo, nomeadamente a sua deformabilidade e a sua resistência ao corte, estão ìntimamente relacionadas com a distância média entre partículas, não é de estranhar que, ao longo da curva de consolidação, se verifique uma evolução dessas características, tornando-se a deformabilidade tanto menor e a resistência ao corte tanto maior quanto maior for a consolidação processada.

Contudo, se essa evolução é fàcilmente compreensível pelas razões apontadas para os estágios de consolidação em que existe acentuada variação do índice de vazios, já outro tanto não acontece em relação às fases mais adiantadas nas quais as variações volumétricas tendem a anular-se. Apesar disso existem alguns indícios que levam a pensar que a evolução tem continuidade mesmo nestas fases. Basta, por exemplo, pensar-se em certas argilas de origem sedimentar, depositadas

(*) Artigo recebido em 25-11-970.